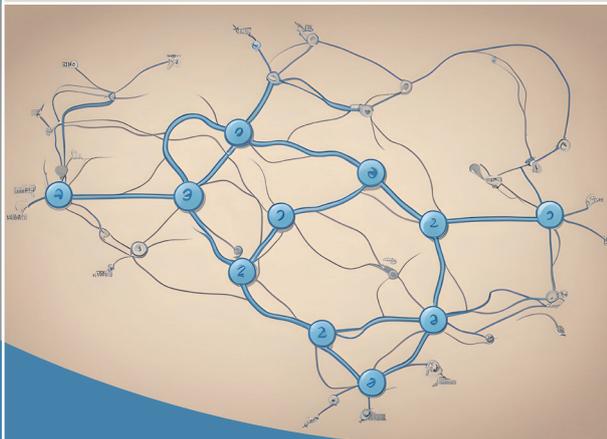
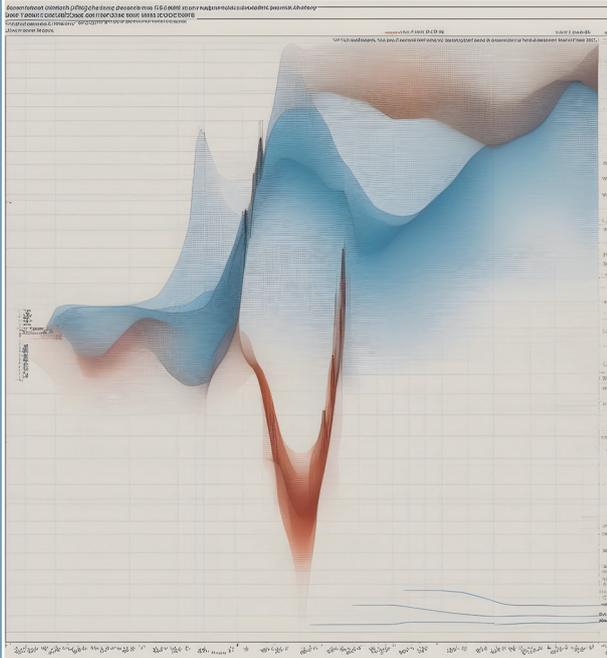


Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management



Fachartikel
Untersuchungen zum Potenzial maschineller Lernverfahren für die hydrologische Simulation und Vorhersage am Beispiel von LSTM und LARSIM in Baden-Württemberg

Praxistransfer: Abflussscheitel-Füllen-Copulas für die Bemessung von Rückhaltebauwerken

Interview
Starkregen & Sturzfluten

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: April 2023)

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

Redaktion:

Dr. Thomas Lüllwitz, Leitung, v.i.S.d.P. • redaktion@hywa-online.de •
Telefon: 0261/1306-5879
Proofreading Englisch: ISL Übersetzungsbüro, 56068 Koblenz

Anschrift:

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

Verlagsrechte:

Die eingereichten Aufsätze und Kurzberichte müssen Originalarbeiten sein. Sie dürfen in der vorgelegten oder in ähnlicher Form weder an anderer Stelle eingereicht noch veröffentlicht sein. Mit der Annahme des Manuskripts willigen die Autoren ein, das eingereichte Manuskript nicht unverändert in einer anderen Zeitschrift zu veröffentlichen.

Hinweis:

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

Erscheinungsweise:

zweimonatlich im Abo, 34,- €/Jahr, Studententarif 17,- € (gg. Nachweis),
Buchhandelbestellung 25 % Rabatt. Kündbar jeweils drei Monate vor
Jahresende.

Herausgeber:

BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und
der Länder

Satz und Druck:

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

The journal Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) (Hydrology and Water Resources Management) is a German-language periodical which comprehensively reports on hydrological topics. It serves as a platform for the publication of the latest developments in science and operational application. The range of contributions relates to the following subjects that are 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: Februar 2024)

Prof. Dr.-Ing. Jens Bender,
Duale Hochschule Baden-Württemberg
Prof. Dr. Günter Blöschl,
Technische Universität Wien
Prof. Dr. Markus Casper,
Universität Trier
Prof. Dr. Bernd Cyffka,
Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt
Norbert Demuth,
Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz
Prof. Dr. Svenja Fischer,
Universität Wageningen/NL
Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt,
Universität Hannover
Dr. Dr. Dietmar Mehl,
biota GmbH
Prof. Dr. Lucas Menzel,
Universität Heidelberg
Prof. Dr. Konrad Miegel,
Universität Rostock
Prof. Dr. Elisabeth I. Meyer,
Universität Münster
Dr. Volker Mohaupt,
Potsdam (ehem. UBA)
Prof. Dr. Heribert Nacken,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Dr. Enno Nilson,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Angela Pfister,
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. Markus Weiler,
Universität Freiburg
Prof. Dr. Rolf Weingartner,
Universität Bern

Inhalt | Contents

Vorwort | Foreword

Künstliche Intelligenz in der Hydrologie	128
--	------------

Fachartikel | Scientific reports

DOI: 10.5675/HyWa_2024.3_1 Orhan D. Tanrikulu, Uwe Ehret, Ingo Haag, Ralf Loritz & Ute Badde Untersuchungen zum Potenzial maschineller Lernverfahren für die hydrologische Simulation und Vorhersage am Beispiel von LSTM und LARSIM in Baden-Württemberg Exploring the potential of machine learning methods for hydrological simulation and forecasting using LSTM and LARSIM in Baden-Württemberg	130
DOI: 10.5675/HyWa_2024.3_2 Nicolas Dalla Valle & Simon Paul Seibert Praxistransfer: Abflussscheitel-Füllen-Copulas für die Bemessung von Rückhaltebauwerken From theory to practice: How to use peak discharge and volume copulas for sizing flood control reservoirs	146

Hydrologische Notizen | Hydrological notes

Aktuelles Latest news	166
Personen Persons	185
Ausbildung Education	186
Interview Interview – Starkregen & Sturzfluten	187

Nachrichten | News

Deutsche Hydrologische Gesellschaft German Hydrological Society	192
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften Association for Hydrological Sciences	194
Termine Events	195

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

Künstliche Intelligenz in der Hydrologie

Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) revolutionieren momentan viele Bereiche unseres privaten und beruflichen Lebens. Als Beispiel für die Möglichkeiten moderner KI seien hier die natürliche Sprachverarbeitung mit Large Language Modellen wie GPT-4 (OpenAI et al., 2023) oder Bildgeneratoren wie DeepAI (<https://deepai.org>) genannt. Mit DeepAI wurden die Bilder auf der Titelseite erzeugt, nach Eingabe der Textvorgaben "flood prediction machine learning river in city", "river network connection similar as brain nerves nodes no text", und "forecast uncertainty estimation band view".

In den hydrometeorologischen Wissenschaften wurde das Potenzial von KI-Methoden zunächst für die Wettervorhersage demonstriert. Vor allem große Tech-Konzerne wie Google (LAM et al., 2023), Huawei (BI et al., 2023) oder Nvidia (KURTH et al., 2023) zeigten, dass KI-basierte Wettervorhersagen denen von physikalisch basierten Vorhersagemodellen ebenbürtig oder sogar überlegen sind. Nationale und internationale Wetterdienste wie das European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF) oder der Deutsche Wetterdienst (DWD) verfolgen daher inzwischen selbst ambitionierte Programme zu KI-basierten Wettervorhersage oder sind dabei sie aufzustellen (DÜBEN et al., 2021).

Auch in der Hydrologie ist das Thema KI angekommen. Seit KRATZERT et al. (2019) gezeigt haben, dass KI-Modelle bessere hydrologische Simulationen von Abflüssen an Pegeln ermöglichen als physikalisch basierte Modelle, ist die Anwendung von KI-Modellen in der hydrologischen Forschung sprunghaft angestiegen.

Der Schlüssel zum Erfolg maschineller Lernverfahren – nicht nur aber auch bei hydrologischen Anwendungen – liegt in ihrer Fähigkeit, große und vielfältige Datensätze zu verarbeiten, daraus komplexe, nichtlineare Beziehungen zu extrahieren und in Netzwerkstrukturen abzubilden. Interne Variablen von KI-Modellen sind dadurch zwar nicht so direkt interpretierbar wie die von physikalisch basierten Modellen, die strukturell dem natürlichen System ähneln, dafür sind sie durch ihre Flexibilität in der Lage, mehr aus vorhandenen Daten zu lernen.

KI-Modelle sind besonders attraktiv für die operationelle hydrologische Vorhersage, da dort nicht so sehr die Modellinterpretierbarkeit im Vordergrund steht, sondern die Vorhersagequalität. Hier wurde kürzlich gezeigt, dass das von Google betriebene KI-basierte globale Hochwasservorhersagesystem FloodHub (<https://sites.research.google/floods>) etablierte großskalige Vorhersagemodelle in der Vorhersagequalität erreicht und übertrifft (NEARING et al., 2024). TANRIKULU et al. (2024) kommen im Aufsatz in der vorliegenden HyWa-Ausgabe zu ähnlichen Schlussfolgerungen für die pegelbezogene Hochwasservorhersage in mesoskaligen Einzugsgebieten Baden-Württembergs.

Das sind primär gute Nachrichten, denn bessere Hochwasservorhersagen können helfen, Menschenleben zu retten und Sach-

schäden zu reduzieren. Andererseits sollte es zu denken geben, dass große private Tech-Konzerne momentan bei der Entwicklung von KI-basierten Hochwasservorhersagemodellen an der Spitze stehen.

In Deutschland ist die Hochwasservorhersage Aufgabe der Länder, und das Single-Voice-Prinzip für Vorhersage und Warnung ist für Einsatzkräfte essentiell, um im Katastrophenfall schnell und effektiv zu handeln. Umso wichtiger ist es, dass die Single Voice auch die beste Botschaft übermittelt, d. h. dass die behördlichen Hochwasservorhersagen jetzt und in Zukunft besser sein sollten als die von privaten Anbietern. Dafür sollten die neuen Technologien bestmöglich für operationelle Dienste zugänglich gemacht werden. Hierbei sind folgende Maßnahmen bedeutend:

- Gemeinsames Erstellen großer nationaler und internationaler hydro-meteorologischer Datensätze für das Training von KI-Modellen nach dem Vorbild von KRATZERT et al. (2023) und dem Global Runoff Data Center (GRDC) an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (<https://grdc.bafg.de/>). Für ein optimales Training müssen diese Datensätze neben hydrometeorologischen Beobachtungsdaten auch archivierte Wetter- und Abflussvorhersagen umfassen.
- Einfache und freie Bereitstellung der Datensätze in standardisierten Formaten um die Entwicklung neuer Modelle und den Praxistransfer zu erleichtern.
- Kompetenzaufbau zum Thema KI-basierte hydrologische Modellierung in Behörden, Fachgremien und Ingenieurbüros: Kurzfristig durch Schaffung von Angeboten zur beruflichen Weiterbildung, mittelfristig durch die Erweiterung des Lehrangebots an Hochschulen und Universitäten.
- Förderung von (Forschungs-)Projekten, die es ermöglichen, aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse aus dem Bereich der KI in die Hochwasservorhersagepraxis der Länder zu überführen.
- Schaffung einfacher Zugangsmöglichkeiten zu Hochleistungsrechnern für Behörden und Ingenieurbüros für das rechenintensive Training von KI-Modellen. Der Betrieb dieser Modelle ist dann meist auf konventionellen Rechnern möglich.

*PD Dr. Uwe Ehret, Dr. Ralf Loritz, Orhan Tanrikulu
Institut für Wasser und Umwelt,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe*

*Dr. Ingo Haag
HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt
und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe*

*Ute Badde
LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe*

Literaturverzeichnis

- BI, K., L. XIE, H. ZHANG, X. CHEN, X. GU & Q. TIAN (2023): Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 619(7970), 533–538. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06185-3>.
- DÜBEN, P., U. MODIGLIANI, A. GEER, S. SIEMEN, F. PAPPENBERGER, P. BAUER, A. BROWN, M. PALKOVIC, B. RAOULT, N. WEDI & V. BAOUSIS (2021): Machine learning at ECMWF: A roadmap for the next 10 years. In: ECMWF Technical Memoranda, 878, ECMWF, 2021.
- KRATZERT, F., G. NEARING, N. ADDOR, T. ERICKSON, M. GAUCH, O. GILON, L. GUDMUNDSSON, A. HASSIDIM, D. KLOTZ, S. NEVO, G. SHALEV & Y. MATIAS (2023): Caravan - A global community dataset for large-sample hydrology. *Scientific Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01975-w>.
- KRATZERT, F., D. KLOTZ, G. SHALEV, G. KLAMBAUER, S. HOCHREITER & G. NEARING (2019): Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>.
- KURTH, T., S. SUBRAMANIAN, P. HARRINGTON, J. PATHAK, M. MARDANI, D. HALL, A. MIELE, K. KASHINATH & A. ANANDKUMAR (2023): FourCast-Net: Accelerating Global High-Resolution Weather Forecasting Using Adaptive Fourier Neural Operators, Proceedings of the Platform for Advanced Scientific Computing Conference, Davos, Switzerland, 2023.
- LAM, R., A. SANCHEZ-GONZALEZ, M. WILLSON, P. WIRNSBERGER, M. FORTUNATO, F. ALET, S. RAVURI, T. EWALDS, Z. EATON-ROSEN, W. HU, A. MEROSE, S. HOYER, G. HOLLAND, O. VINYALS, J. STOTT, A. PRITZEL, S. MOHAMED & P. BATTAGLIA (2023): Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science*, 382, 1416–1421, DOI:10.1126/science.adi2336, 2023.
- NEARING, G., D. COHEN, V. DUBE, M. GAUCH, O. GILON, S. HARRIGAN, A. HASSIDIM, D. KLOTZ, F. KRATZERT, A. METZGER, S. NEVO, F. PAPPENBERGER, C. PRUDHOMME, G. SHALEV, S. SHENZIS, T.Y. TEKALIGN, D. WEITZNER & Y. MATIAS (2024): Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature*, 627, 559–563, 10.1038/s41586-024-07145-1.
- OPENAI, J. ACHIAM, S. ADLER, S. AGARWAL, L. AHMAD, I. AKKAYA, F.L. ALEMAN, D. ALMEIDA, J. ALTENSCHMIDT, S. ALTMAN, S. ANADKAT, R. AVILA, I. BABUSCHKIN, S. BALAJI, V. BALCOM, P. BALTESCU, H. BAO, M. BAVARIAN, ... B. ZOPH (2023): GPT-4 Technical Report. <http://arxiv.org/abs/2303.08774>.

Orhan D. Tanrikulu, Uwe Ehret, Ingo Haag, Ralf Loritz & Ute Badde

Untersuchungen zum Potenzial maschineller Lernverfahren für die hydrologische Simulation und Vorhersage am Beispiel von LSTM und LARSIM in Baden-Württemberg

Exploring the potential of machine learning methods for hydrological simulation and forecasting using LSTM and LARSIM in Baden-Württemberg

Die Simulation und Vorhersage von Abfluss in Gewässern ist eine zentrale Aufgabe der hydrologischen Modellierung. Dazu finden prozessbasierte, konzeptionelle und datenbasierte Methoden Anwendung, wobei vor allem für letztere in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung stattgefunden hat. In diesem Kontext ist es das Ziel dieser Studie, das Potenzial von Long Short-Term Memory (LSTM) Modellen für die langfristige Abflusssimulation und für die kurzfristige Abflussvorhersage zu untersuchen. Dazu werden LSTM-Modelle für vier Pegel in Baden-Württemberg auf Basis hydro-meteorologischer Eingangsgrößen aufgestellt und Abflusssimulationen über vier Jahre bzw. 72 Stunden in die Zukunft reichende Abflussvorhersagen für Hochwasser auf Basis gemessener meteorologischer Antriebsdaten erstellt. Diese werden mit Abflussmessungen an den Pegeln und mit den Ergebnissen des etablierten prozessbasierten Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) verglichen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die wichtigsten Einflussgrößen für die Simulationsgüte der LSTMs i) die zeitliche Tiefe des Netzwerks, ii) die Wahl der Eingangsgrößen und iii) die Wahl der Zielfunktion für das Training sind. Für i) stellten sich 3 Monate als bester Kompromiss zwischen Simulationsgüte und Rechenzeit heraus, für ii) verbesserte die Hinzunahme aggregierter Zeitreihen zusätzlich zu den stündlichen Eingangsdaten die Simulationsgüte, und für iii) verbesserte die Erweiterung des mittleren quadratischen Fehlers mit einer zusätzlichen Gewichtung des höchsten aufgetretenen Fehlers die Simulationsgüte vor allem für hohe Abflüsse. Weitere Modifikationen der Eingangsgrößen wie Quantiltransformation und stratifizierte Datenauswahl ergaben keine Verbesserungen. Die Langfristsimulationen mit den LSTMs sind sehr gut (Nash-Sutcliffe Effizienzen von 0,84 bis 0,90) und qualitativ vergleichbar mit denen von LARSIM. Auch hinsichtlich der Wiedergabe von gemessenen Hochwasserscheiteln erzielen die LSTMs sehr gute Ergebnisse, die qualitativ mit denen von LARSIM vergleichbar sind.

Für die Vorhersage von Hochwasser wurden zwei LSTM-Varianten aufgestellt: Rekursive LSTMs, die ihre eigene Vorhersage des vorigen Zeitschritts als Eingangsgröße nutzen, und multi-LSTMs, bei denen für jede Vorhersagetiefe ein separates LSTM trainiert wird. Es zeigte sich, dass rekursive LSTMs wegen des Effekts der Fehlerfortpflanzung weniger robust sind als multi-LSTMs. Mit den multi-LSTMs wurden auch bei den Hochwasservorhersagetests ähnlich gute Ergebnisse erzielt wie mit LARSIM. Auf Basis dieser Ergebnisse wird dargelegt, das Potenzial von maschinellen Lernverfahren für die hydrologische Simulation und Vorhersage weiter auszuloten und auszuschöpfen, zum Beispiel durch die Kombination der Stärken prozessbasierter und datenbasierter Modelle in hybriden Systemen.

Schlagwörter: Maschinelles Lernen, LSTM, LARSIM, Simulation, Vorhersage

The simulation and forecasting of catchment runoff is a central task of hydrological modelling. For this purpose, process-based, conceptual and data-based methods are used, and especially the latter method has shown rapid development in recent years. In this context, the aim of this study is to investigate the potential of Long Short-Term Memory (LSTM) models for long-term simulation and for short-term forecasting of catchment runoff. For these purposes, LSTM models are trained for four gauging stations in Baden-Württemberg using hydro-meteorological input variables, and applied for four years of continuous runoff simulation and 72-hour short-term flood forecast tests based on measured meteorological driving data. The model results are compared with measurements from gauging stations and with the results of the well-established process-based water balance model LARSIM. The results of this study show that the most effective parameters for the LSTM's simulation quality are i) input sequence length, ii) choice of input variables, and iii) choice of the objective function for training. With respect to i), 3 months turned out to be the optimum trade-off between simulation quality and training time, with respect to ii) using aggregated time series data in addition to the hourly input data improved the simulation quality, and with respect to iii) a modified mean squared error with an additional weighting of the highest error improved the simulation quality especially for high discharges. Further modifications and manipulations of the input variables such as quantile mapping and stratified sampling did not result in any improvements. Long-term simulations by LSTMs are very good (Nash-Sutcliffe efficiencies of 0.84 to 0.90) and comparable in quality to LARSIM. The LSTMs also achieve very promising results in simulating observed flood peaks, comparable in quality to the LARSIM simulations.

Two LSTM variants were established for short-term discharge forecast: Recursive LSTM, which uses its own streamflow simulation from the previous time step as an input, and multi-LSTM, in which separate LSTMs are trained for each forecast depth. It was shown that the Recursive LSTMs are less robust than the multi-LSTMs, mainly due to the effect of error propagation. With the multi-LSTMs short-term forecast tests achieved results comparable in quality to those of LARSIM. Based on these results, we propose to further explore and investigate the potential of machine learning methods for hydrological runoff simulation and forecasting, for example by combining the strengths of process-based and data-based models in hybrid systems.

Keywords: Machine Learning, LSTM, LARSIM, simulation, forecast

1 Einleitung

Die Simulation und Vorhersage von Abfluss in Gewässern ist schon immer eine wichtige Aufgabe der Hydrologie. Die ersten Modelle dazu beruhten auf einfachen Regressionen (MULVANY, 1851), mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Messdaten, Prozessverständnis und der Rechenkapazität von Computern wurden sie weiterentwickelt zu konzeptionellen, prozessbasierten, und datenbasierten Modellen. Konzeptionelle und prozessbasierte Modelle beruhen hauptsächlich auf der Kombination von physikalischem Prozesswissen und messbaren Strukturgrößen in festen Systemarchitekturen. Datenbasierte Modelle hingegen lernen Beziehungen zwischen Eingabedaten und Zielvariablen hauptsächlich aus gemessenen Zeitreihen relevanter Eingangs- und Ausgangsgrößen. Die Werkzeuge für den Lernprozess datenbasierter Modelle werden heutzutage meist unter dem Begriff Machine Learning (ML) zusammengefasst. ML umfasst Methoden, mit denen ein Computer mit Hilfe von Algorithmen und statistischen Methoden ohne explizite Anweisungen durch einen Nutzer Muster in Daten erkennen und für verschiedene Zwecke nutzbar machen kann (XU und LIANG, 2021). Künstliche neuronale Netze (artificial neural networks (ANN)) spielen dabei wegen ihrer Flexibilität inzwischen eine zentrale Rolle. ANNs basieren auf Arbeiten von MCCULLUCH und PITTS (1943), die neuronale Netzwerke als Rechenarchitekturen vorschlugen, HEBB (1949), der dafür einen Lernalgorithmus entwickelte, und ROSENBLATT (1958), der das Perceptron einführte, eine spezielle neuronale Netzwerkarchitektur, die die Basis moderner ANNs bildet. Eine breite Nutzung erfuhren ANNs schließlich mit der Entwicklung effizienter Trainingsmethoden (RUMELHART et al., 1986) und leistungsfähiger Computer. In der Hydrologie kommen ANNs seit Anfang der neunziger Jahre zur Anwendung (KANG et al., 1993). Die Qualität der Ergebnisse war vor allem dadurch limitiert, dass hydrologische Zeitreihen stark autokorreliert sind, solche zeitlichen Abhängigkeiten aber durch ANNs nicht direkt abgebildet werden können (RUMELHART et al., 1986). Rekurrente neuronale Netzwerke (RNN), eine Weiterentwicklung von ANNs, können zeitliche Abhängigkeiten abbilden, allerdings hauptsächlich für kurze Zeiträume. Langzeitabhängigkeiten, wie zum Beispiel der Einfluss von winterlichem Schneefall auf Abflüsse im Frühjahr, werden von RNNs "vergessen". Dieses Problem wurde durch die Entwicklung von Long Short-Term Memory Netzwerken (LSTM) durch HOCHREITER und SCHMIDHUBER (1997) weitgehend behoben. Long Short-Term Memory Netzwerke haben sich daher für die ML-basierte hydrologische Modellierung rasch als Standard etabliert. KRATZERT et al. (2018) zeigten am Beispiel von 241 Einzugsgebieten aus dem CAMELS-US Datensatz (NEWMAN et al., 2015; ADDOR et al., 2017), dass LSTM-Modelle eine ähnlich gute, tägliche Abflussimulation ermöglichen wie das konzeptionelle hydrologische Modell SAC-SMA. Speziell im Hinblick auf die Simulation von Niedrigwasser kommen SAHOO et al. (2019) zu ähnlichen Ergebnissen.

HU et al. (2018) zeigten anhand einer Simulation von 98 Hochwasserereignissen im Einzugsgebiet des Fen-Flusses, dass LSTMs sich auch für die Hochwasservorhersage eignen und bessere Ergebnisse liefern als ein konzeptionelles hydrologisches Modell. Diese Ergebnisse werden unterstützt durch NEVO et al. (2022), die zeigten, dass LSTMs erfolgreich für die operationelle Hochwasservorhersage in großen Flusseinzugsgebieten eingesetzt werden können, und HUNT et al. (2022), die LSTMs erfolgreich für die Mittelfrist-Hochwasservorhersage nutzten.

In diesem Kontext ist es das Ziel dieser Studie, das Potenzial von LSTM-Modellen für die Langfristsimulation (im folgenden "Simulation") und die Kurzfristvorhersage (im folgenden "Vorhersage") von Abfluss an Gewässerpegeln in Baden-Württemberg zu untersuchen, und durch den Vergleich mit den Ergebnissen eines etablierten prozessbasierten Modells zu bewerten. Dazu werden LSTMs für vier Pegel in Baden-Württemberg aufgestellt. Die Pegel wurden so ausgewählt, dass sie bzgl. Einzugsgebietsgröße und Abflusscharakteristik ein breites Spektrum abdecken. Bei der Simulation werden vierjährige Abflusszeitreihen mit gemessenen Antriebsdaten simuliert. Bei der Vorhersage werden 72-stündige Abflussvorhersagen erstellt, ebenfalls unter Verwendung gemessener Antriebsdaten. Es handelt sich daher um Vorhersagetests unter der idealen Randbedingung, dass das Wetter im Vorhersagezeitraum bekannt ist. Der Grund für die Wahl dieser idealen Randbedingung ist dadurch bedingt, dass dadurch die Qualität der Wettervorhersage keinen Einfluss auf die Qualität der Abflussvorhersage hat, und somit die Qualität der hydrologischen Modelle direkter beurteilt werden kann.

Für die Simulation und die Vorhersage werden jeweils eigene LSTM-Modelle aufgestellt, und die Ergebnisse mit Messdaten und Ergebnissen des Wasserhaushaltsmodells LARSIM verglichen (BREMICKER, 2000; LEG, 2023). Für die Simulationen erfolgt der Vergleich in einem zusammenhängenden Zeitraum von vier Jahren für die Vorhersagen für eine Auswahl der jeweils höchsten an jedem Pegel gemessenen Hochwasserereignisse. Für die Beurteilung der Simulations- bzw. Vorhersagequalität wird das Gütemaß Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE) verwendet.

Der Artikel ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 werden die verwendeten Daten, Methoden und Modelle vorgestellt, und die durchgeführten Experimente beschrieben. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Experimente vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 4 werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

2 Daten und Methoden

2.1 Hydrometeorologische Daten

LSTM-Modelle wurden für insgesamt vier Pegel in Baden-Württemberg aufgebaut. Die entsprechenden LARSIM-Modelle wurden unverändert von der LUBW übernommen. Die Lage der Pegel, ihre Einzugsgebiete und die wichtigsten Fließgewässer sind in Abbildung 1 dargestellt, hydrologische Kenngrößen der Pegel sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Pegel liegen in den Einzugsgebieten der Enz und der Rems und wurden so ausgewählt, dass sie ein breites Spektrum von Gebietsgrößen und Abflusscharakteristika abdecken. Die Gebietsgrößen reichen von 76 km² (Haubersbronn/Wieslauf) 418 km² (Schorndorf/Rems), die spezifischen mittleren Abflüsse reichen von 11,7 l s⁻¹ km⁻² (Haubersbronn/Wieslauf) bis 24,8 l s⁻¹ km⁻² (Lautenhof/Enz), und das Verhältnis zwischen mittlerem und höchstem Abfluss im Messzeitraum reicht von 23,6 (Lautenhof/Enz) bis 92,2 (Schwäbisch Gmünd/Rems). Für fast alle Pegel standen 24-jährige Zeitreihen stündlicher Messwerte zur Verfügung (siehe Tab. 1), lediglich für Schwäbisch Gmünd/Rems standen nur 18 Jahre zur Verfügung.

Für LARSIM und die LSTM-Modelle wurden gemessene Zeitreihen von Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung als Antrieb genutzt, für LARSIM zusätzlich noch Luftfeuchte, Wind-

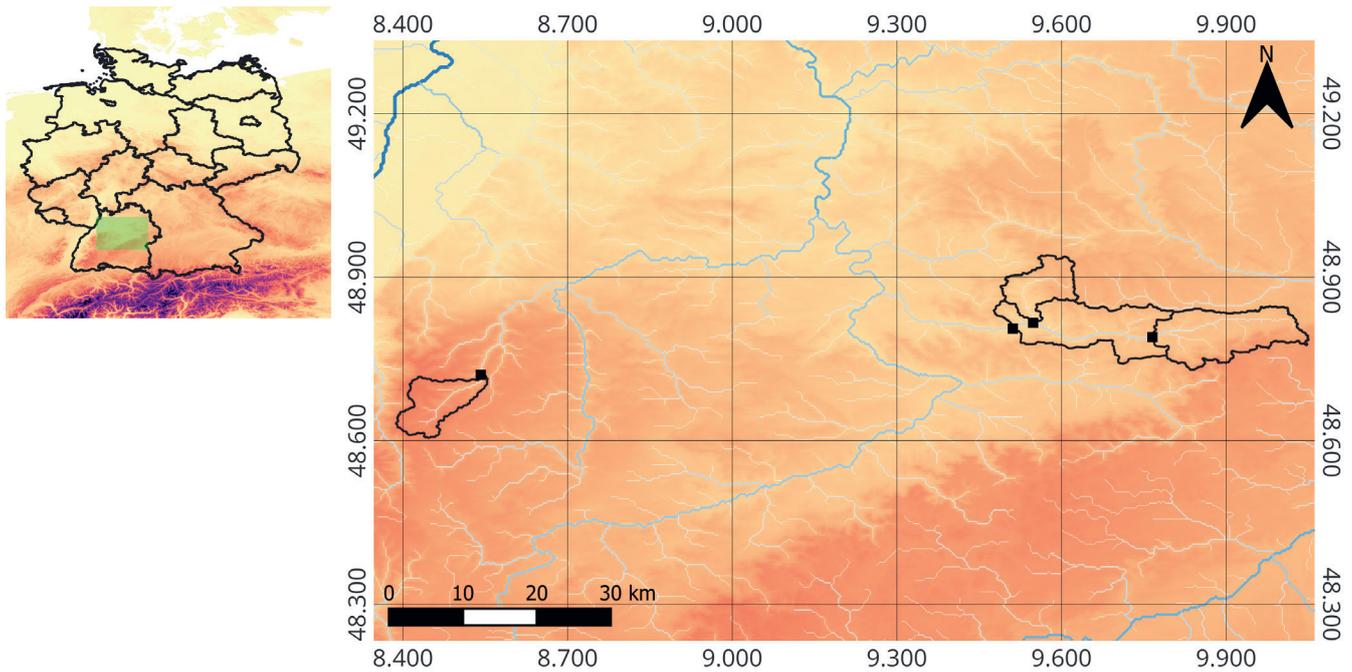


Abbildung 1
 Lage der vier Untersuchungspegel und ihrer Einzugsgebiete in Deutschland und Baden-Württemberg. Hintergrundkarte: HYDROSHEDS (<https://www.hydrosheds.org/products/hydrosheds>).
 Location of the four gauging stations and their catchment areas in Germany and Baden-Württemberg. Background map: HYDROSHEDS.

geschwindigkeit und Luftdruck. Grundsätzlich können für die LSTM-Modelle eine beliebige Anzahl von Antriebsdaten genutzt werden, allerdings steigt damit die Gefahr des "Overfittings" (siehe Kap. 2.2) und der Aufwand für Modelltraining und -betrieb. Für die hier aufgestellten LSTM-Modelle zeigten sich die genannten drei Eingangsdaten als bester Kompromiss zwischen Umfang und Informationsgehalt. Die als punktuelle Stationsmessdaten vorliegenden Zeitreihen wurden nicht direkt als Eingangsdaten für die Modelle verwendet. Vielmehr wurden mithilfe eines in LARSIM integrierten modifizierten Rasterpunktverfahrens Zeitreihen der Einzugsgebetsmittel erstellt und als Input für die Modelle verwendet. Die Methoden zur Ermittlung der Einzugsgebetsmittelwerte sind in der LARSIM-Dokumentation (LEG, 2023) in Kapitel 3.2.4 detailliert beschrieben. Es ist zu beachten, dass die LARSIM-Einzugsgebiete eine Größe von jeweils 1 km² haben (siehe Kap. 2.3), die der LSTMs entsprechen den Gebietsgrößen in Tabelle 1. Die räumliche Auflösung der Eingangsdaten ist daher für LARSIM höher als für die LSTMs, da die Einzugs-

gebiete aber relativ klein sind, ist der daraus resultierende Informationsverlust aber als relativ gering anzusehen.

2.2 LSTM Struktur und Training

Die folgende kurze Einführung in die Struktur von LSTMs ist mit leichten Modifikationen entnommen aus KRATZERT et al. (2021). Weitere Details sind dort, und in KRATZERT et al. (2018) nachzulesen.

"Das LSTM gehört zur Familie der rekurrenten neuronalen Netze. Dies sind neuronale Netze, die Eingabedaten in sequenzieller Reihenfolge verarbeiten. Eine spezielle Eigenschaft von LSTMs ist, dass sie dedizierte interne Speicher besitzen, um Informationen für lange Zeit speichern zu können. Zusätzlich verfügen LSTMs über eine Reihe von sogenannten Gates. Diese kontrollieren in jedem Zeitschritt (a) welche Informationen aus dem Speicher gelöscht werden, (b) was für neue Informationen aus den Eingabedaten in den internen Speicher hinzugefügt werden, und

Tabelle 1
 Übersicht über die hydrologischen Eigenschaften der vier Untersuchungspegel und -gebiete, und die verfügbaren Messzeitreihen.
 Overview of the hydrological properties of the four gauges and catchments, and the available measurement time series.

Pegelname	Gewässer	Gebietsgröße [km ²]	Mittlerer Abfluss im Messzeitraum [m ³ /s]	Maximaler Abfluss im Messzeitraum [m ³ /s]	Messzeitraum
Lautenhof	Enz	84,5	2,1	49,6	01.05.1996 – 31.05.2021
Schwäbisch Gmünd	Rems	168,6	2,0	184,4	01.01.2003 – 31.05.2021
Haubersbronn	Wieslauf	76,7	0,9	76,2	01.05.1996 – 31.05.2021
Schorndorf	Rems	418,2	5,2	225,8	01.05.1996 – 31.05.2021

(c) aus welchen Informationen des aktuellen Speichers die Vorhersage gewonnen werden kann".

Die Anzahl der Schichten ("layers") und der zeitlichen Tiefe ("input sequence length" ISL) des LSTM-Netzwerks bilden wichtige strukturelle Parameter, die zusammen mit den Werten aller freien Modellparameter mit Hilfe von vorhandenen Eingangs- und Zielgrößen durch Optimierung bestimmt werden.

LSTMs sind durch ihre inhärente Flexibilität sehr gut geeignet, beliebige Muster in Daten zu erkennen und sie für Aussagen über andere Daten zu nutzen. Diese Flexibilität bringt allerdings im Vergleich zu prozessbasierten Modellen die erhöhte Gefahr des "Overfittings" mit sich, d. h. dass, statt allgemein gültige und robuste Zusammenhänge zwischen den Daten zu lernen, lediglich der Trainingsdatensatz "auswendig gelernt" wird (MAIER et al., 2023). Diese Gefahr kann durch eine geschickte Nutzung der vorhandenen Daten verkleinert werden. Dazu wird ein Teil der Daten direkt für die Bestimmung der Modellparameter durch Optimierung genutzt ("Parameter Training", entspricht der Kalibrierung in der hydrologischen Literatur). Das so optimierte Modell wird in einem separaten Zeitraum angewendet und die Modellgüte bewertet. Die Modellgüte in diesem Zeitraum steuert die Wahl globaler Modellparameter ("Hyperparameter" wie z. B. die Art der Netzwerks, die Anzahl der Netzwerkschichten und -knoten, oder die Wahl der Zielfunktion für die Parameteroptimierung). Dieser Schritt wird als "Hyperparameter Training" bezeichnet und mehrmals iterativ durchlaufen. Er ist in der hydrologischen Literatur am ehesten mit "Modellselektion" gleichzusetzen. Da die Wahl der Hyperparameter auf Basis von Daten erfolgt, die nicht für das Training genutzt wurden, wird die Gefahr des Overfittings reduziert. Außerdem werden weitere Techniken wie Dropout, L1- und L2-Regularisierung verwendet, um ein Overfitting zu verhindern (FROCHTE, 2020).

Das finale Modell, mit festgelegten Werten für Hyperparameter und Parameter, wird abschließend anhand eines bis dahin unter Verschluss gehaltenen Datensatzes final beurteilt ("Validierung"). Dafür werden üblicherweise ca. 20 % der vorhandenen Daten verwendet (JOSEPH, 2022). Die Modellgüte im Validierungszeitraum gibt Aufschluss darüber, wie gebrauchstauglich das Modell ist, d. h. wie gut es bei neuen Situationen funktioniert. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier gewählte Terminologie auf hydrologische Verhältnisse angepasst ist. In der englischsprachigen Fachliteratur zu Machine Learning wird für den hier "Hyperparameter Training" genannten Schritt häufig der Begriff "Validation" verwendet, und für den hier "Validation" genannte Schritt der Begriff "Testing". Details dazu, und zum Aufbau und Training von neuronalen Netzwerken sind ausführlich und übersichtlich in MAIER et al. (2023) dargestellt.

2.3 LARSIM

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell) wurde von BREMICKER (2000) entwickelt. Mit dem Modell werden Interzeption, Schneedynamik, Evapotranspiration, Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung auf der Ebene räumlich hoch aufgelöster Hydrotope mit jeweils gleicher Landnutzung und ähnlichen Bodeneigenschaften prozessorientiert simuliert. Abflusskonzentration und Abflussfortpflanzung in den Gewässern werden auf der Ebene von Teileinzugsgebieten prozessorientiert simuliert. Eine Übersicht der Modellstruktur ist in LEG (2023), Abbildung 3-1 zu sehen. Im hier verwendeten

LARSIM-Modell für das Neckareinzugsgebiet bestehen die Teileinzugsgebiete aus einem regelmäßigen Raster der Größe 1 km² (LUCE et al., 2006). Das Modell wird durch eine LARSIM-Entwicklergemeinschaft gepflegt und kontinuierlich koordiniert weiterentwickelt (BREMICKER et al., 2013; LEG, 2023). LARSIM-Modelle werden für zahlreiche Fragestellungen angewandt, wie z. B. die Analyse von Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt (STAHL et al., 2016; THIREL et al., 2019), die Analyse vergangener Ereignisse (LUDWIG et al., 2023), die Bemessung und Maßnahmenplanung (BREMICKER et al., 2013; HAAG et al., 2023), die Analyse von Sturzfluten in der Folge lokaler Starkregen (HAAG et al., 2022) sowie die Simulation und Vorhersage von Niedrigwasser und Wassertemperaturen (HAAG & LUCE, 2008; ISHIKAWA et al., 2021; HAAG et al., 2023).

Ein zentraler Anwendungsbereich von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen ist jedoch die operationelle Hochwasservorhersage. Entsprechend werden räumlich hoch aufgelöste LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle in zahlreichen Bundesländern, unter anderem in Baden-Württemberg, sowie in der Schweiz und Österreich standardmäßig für die Hochwasservorhersage und Hochwasserwarnung angewandt (BREMICKER et al., 2013; LEG, 2023). LARSIM ist somit ein etabliertes und weit verbreitetes prozessbasiertes Hochwasservorhersagemodell, das sich gut als Referenz für die hier untersuchten LSTM-Modelle eignet.

2.4 Experimente

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie LARSIM und die LSTM-Modelle für die Simulationen und Vorhersagen aufgestellt und betrieben wurden, und auf welche Weise sie mit Messdaten und untereinander verglichen wurden. Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, werden bei der Simulation vierjährige Abflusszeitreihen mit gemessenen Antriebsdaten simuliert. Bei der Vorhersage werden 72-stündige Abflussvorhersagen erstellt, ebenfalls unter Verwendung gemessener Antriebsdaten. Es handelt sich daher um Vorhersagetests unter der idealen Randbedingung, dass das Wetter im Vorhersagezeitraum bekannt ist. Der Grund für die Wahl dieser idealen Randbedingung ist, dass dadurch die Qualität der Wettervorhersage keinen Einfluss auf die Qualität der Abflussvorhersage hat, und somit die Qualität der hydrologischen Modelle besser beurteilt werden kann.

2.4.1 LSTM-Modelle

Für jedes Untersuchungsgebiet wurden jeweils eigene LSTM-Modelle aufgestellt, die unabhängig voneinander betrieben wurden. Das stellt einen Unterschied zu prozessbasierten Flussgebietsmodellen dar, bei denen der in einem Oberliegergebiet simulierte oder vorhergesagte Abfluss über das Gewässernetz stromabwärts weitergereicht wird und damit in Unterliegergebieten als Eingangsgröße zur Verfügung steht. Für die Simulation und die Vorhersage wurden jeweils eigene LSTM-Modelle trainiert, um eine bestmögliche Anpassung an die jeweilige Aufgabe und Datenverfügbarkeit zu ermöglichen. Entgegen der üblichen Vorgehensweise beim Aufbau von Machine Learning Modellen (siehe Kap. 2.2) wurden die verfügbaren Daten nicht in drei sondern nur in zwei Zeiträume aufgeteilt: Das Parameter Training der Modelle erfolgte mit Daten aus dem Zeitraum 1. Mai 1996 bis 30. September 2016 (> 20 Jahre), das Hyperparameter Training erfolgte mit Daten aus dem Zeitraum 1. Oktober 2016 bis 31. Mai 2021 (> 4 Jahre). Der Grund für diese Wahl lag in der verbesserten Vergleichbarkeit mit den LARSIM-Ergebnissen: LARSIM wurde mit Daten aus dem gesamten Zeitraum kalibriert

(siehe Kap. 2.4.2), ein Vergleich mit LSTM Validierungsergebnissen hätte daher einen einseitigen Vorteil für LARSIM dargestellt. Die LSTM-Hyperparameter werden in Kapitel 2.4.1.1 näher erläutert, und in Kapitel 2.4.1.2 werden zwei LSTM-Modellvarianten für die Vorhersage – rekursive und multi-LSTM – vorgestellt und ihre jeweiligen Stärken und Schwächen beschrieben.

2.4.1.1 Allgemeiner Modellaufbau

Alle in dieser Studie erstellten LSTM-Modelle bestehen aus zwei Schichten. Zwei-Schicht LSTMs bieten einen guten Kompromiss zwischen Flexibilität und Optimierbarkeit (HEATON, 2008) und werden sehr häufig verwendet (KRATZERT et al., 2018). Für die Bestimmung der optimalen Anzahl von Basiseinheiten wurden die Varianten {20, 30, 64, 80, 100, 120, 128, 256} pro Schicht untersucht. Dabei erwies sich die Kombination 128-64 als optimal und wurde für alle Modelle verwendet.

Neben der Anzahl der Schichten und Basiseinheiten ist die input sequence length ISL (siehe Kap. 2.2) einer der wichtigsten LSTM-Hyperparameter. Die ISL bezeichnet die Länge des im Netzwerk abgebildeten Zeitfensters. In Abbildung 2 (a) ist dieses Zeitfenster exemplarisch als grünes Rechteck im gesamten Parameter Trainingszeitraum abgebildet, in Abbildung 2 (b) ist das Zeitfenster im Detail dargestellt. Um Abfluss zu einem Zeitpunkt t_0 zu simulieren, nutzt das LSTM alle Eingangsdaten X im Zeitfenster $t = [t_0-1, \dots, t_0-ISL]$. Für hydrologische Modelle wird in der Literatur meist ein Zeitfenster von einem Jahr empfohlen (KRATZERT et al., 2018; GAUCH et al., 2021; FRAME et al., 2022; NEARING et al., 2022), um dem Modell Zugang zu allen Daten des hydrologischen Jahresgangs zu geben. Dabei handelt es sich allerdings meist um Tageswertmodelle, womit der Datenumfang begrenzt bleibt und bei der (rechenintensiven) LSTM-Optimierung keine Rechenzeitprobleme erzeugt. Im Rahmen der hier

vorgestellten Arbeiten wurden aber Stundendaten verwendet, was mit den für diese Studie zur Verfügung stehenden Rechenressourcen eine Verkürzung des Zeitfensters auf drei Monate erforderlich machte. Um den damit verbundenen Informationsverlust über den hydrologischen Jahresgang wie z. B. saisonübergreifende Effekte von Schnee, Grundwasser und Bodenfeuchte zu kompensieren, wurden zusätzlich zu den Niederschlagsdaten in Stundenaufösung auch noch Zeitreihen aggregierter Niederschläge (Tages-, Wochen-, Monats-, und 3-Monats-Summen) erzeugt und als Modellantrieb verwendet.

Ein weiterer wichtiger Hyperparameter ist die Wahl der für die Optimierung verwendeten Zielfunktion. Die Zielfunktion misst den Abstand zwischen der Modellsimulation und den zugehörigen Beobachtungswerten, dieser wird im Verlauf des Parameter-Trainings durch Parametervariation iterativ minimiert. Für Optimierungsaufgaben existieren eine Vielzahl von Zielfunktionen, die allgemein gebräuchlichste (auch in ML) ist der mittlere quadratische Fehler MSE. Im MSE werden große Abweichungen überproportional gewichtet und damit bei der Optimierung bevorzugt verkleinert (WANG et al., 2022). Für die hydrologische Modellierung mit dem Ziel einer guten Wiedergabe hoher Abflüsse bietet sich daher der MSE als Zielfunktion an, und wurde zunächst auch für die LSTM-Optimierung verwendet. Dabei zeigte sich, dass Hochwasserabflüsse – trotz ihrer großen Werte – aufgrund ihrer Seltenheit in der Zielfunktion zu wenig Gewicht haben, so dass die Wiedergabe von Hochwasserabflüssen nicht zufriedenstellend war. Um große Fehler bei großen Abflüssen noch stärker zu berücksichtigen wurde schließlich ein erweiterter MSE-Wert entwickelt und verwendet (siehe Gl. 1).

$$MSE^+ = MSE + k (\max[obs - sim]^2) \tag{1}$$

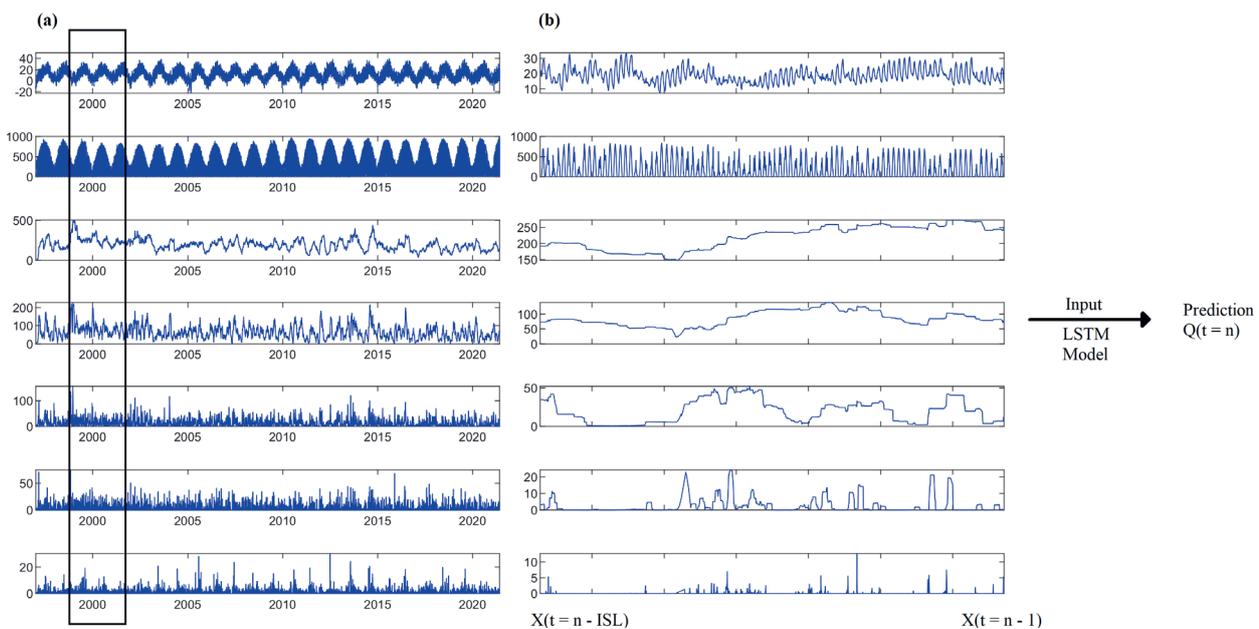


Abbildung 2
 Übersicht zur Datennutzung beim LSTM-Training: (a) Darstellung aller Daten für das Parameter Training und der Länge einer Trainingssequenz; (b) Exemplarische Darstellung einer Trainingssequenz im Detail.
 Use of data for LSTM Training: (a) Representation of all data for the parameter training and the length of a training sequence; (b) Exemplary representation of a training sequence length in detail.

Dabei wird der MSE um den größten aufgetretenen Fehler ergänzt, der durch den Faktor k variabel gewichtet werden kann. Durch Variation von k im Wertebereich $[0,5]$ wurde schließlich als bester Wert $k = 0,2$ bestimmt. In Abbildung 3 sind exemplarisch für den Untersuchungspegel Lautenhof/Enz Streudiagramme für gemessene gegen LSTM-simulierte Abflüsse gezeigt, wobei das LSTM einmal mit MSE optimiert wurde (obere Reihe), und einmal mit MSE^+ (untere Reihe). Insbesondere für den Trainingszeitraum (linke Spalte) zeigt sich für den MSE^+ eine deutlich realitätsnähere Abbildung hoher Abflüsse als für MSE. Auch für den Testzeitraum liegen die MSE^+ -basieren Simulationen insgesamt näher an den Messungen.

Neben MSE und MSE^+ wurde als Zielfunktionen auch noch NSE getestet, der allerdings keine Verbesserungen gegenüber MSE^+ erbrachte. Zusätzlich zu den genannten Anpassungen wurde noch untersucht, inwieweit eine Transformation und Erweiterung der Eingangsdaten die Modellgüte verbessert. Untersucht wurden die Quantiltransformation und die stratifizierte Auswahl der Eingangsdaten, beide mit dem Ziel einer stärkeren Gewichtung

hoher Abflusswerte, und die Hinzunahme einer Abflusskategorisierung in drei Klassen auf Basis der Abflussdauerlinie jedes Pegels. Keine dieser Maßnahmen führte zu einer Verbesserung der Modellgüte, so dass sie nicht weiter verwendet wurden. Darüber hinaus wurde untersucht, ob ein regionales LSTM-Training im Vergleich zu lokalem Training Vorteile bietet. Beim regionalen Training wird zuerst ein gemeinsames regionales LSTM mit den Daten aller Untersuchungsgebiete trainiert; anschließend wird das regionale LSTM jeweils einzeln mit lokalen Daten aus den Gebieten nachtrainiert und damit lokal verfeinert. Regional trainierte LSTMs sind durch die Größe und hohe Bandbreite des regionalen Trainingsdatensatzes üblicherweise robuster als ausschließlich lokal trainierte Modelle (KRATZERT et al., 2019). Im Rahmen dieser Studie wurden beide Varianten untersucht, und, da die Unterschiede in der Modellqualität nur gering waren (in der Größenordnung $\pm 0,05$ NSE), wurden aus Gründen der Einfachheit in der Folge lokal trainierte Modelle verwendet. Der positive Effekt des regionalen Modelltrainings war vermutlich wegen der geringen Anzahl von nur vier beteiligten Gebieten klein. Für Untersuchungen mit vielen Gebieten bietet sich aber regionales Training an.

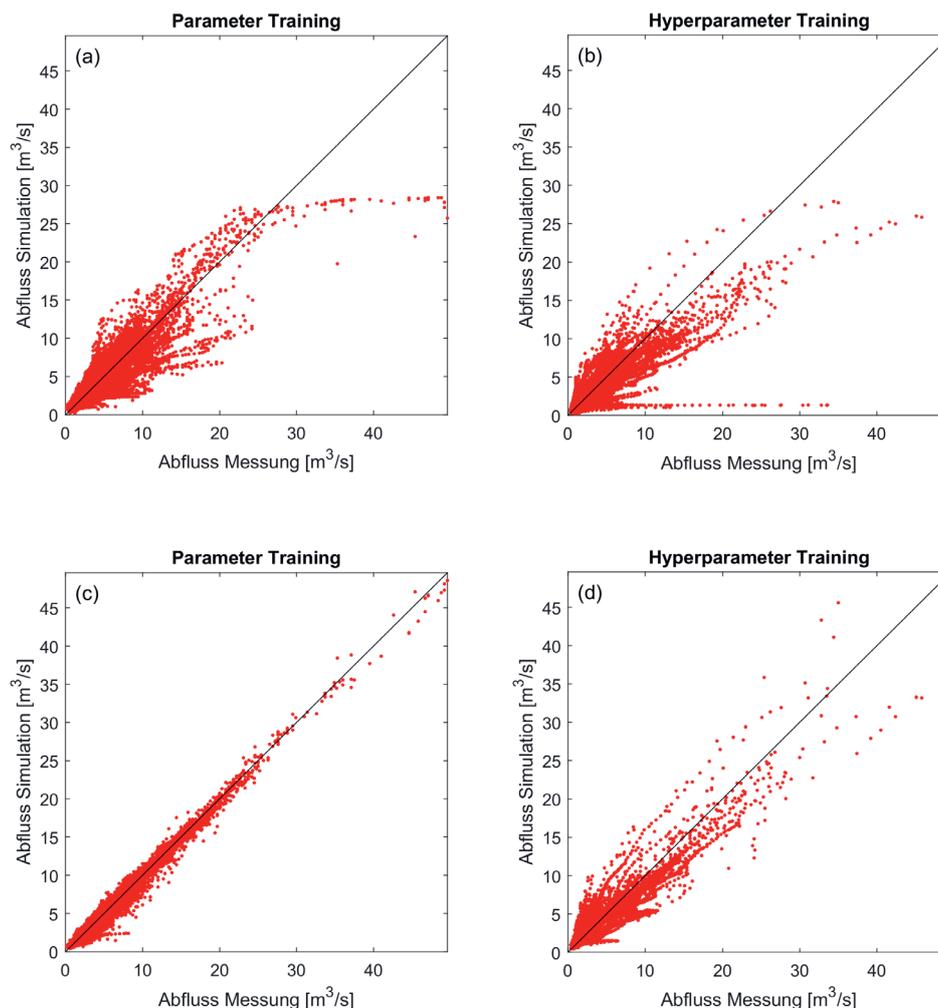


Abbildung 3

Ergebnisse für LSTM-Parameter- und Hyperparameter-Training mit Zielfunktion MSE (a und b) und mit Zielfunktion MSE^+ (c und d) am Pegel Lautenhof/Enz.

Results for LSTM parameter and hyperparameter training with objective function MSE (a and b) and with objective function MSE^+ (c and d) at gauge Lautenhof/Enz.

2.4.1.2 Modellvarianten für die Vorhersage

Bei der operationellen hydrologischen Vorhersage liegt der Fokus auf der korrekten Vorhersage von Abflusswerten in der nahen Zukunft, üblicherweise im Zeitraum von Stunden bis Tagen, während in der Langfristsimulation der Fokus auf der korrekten Wiedergabe des hydrologischen Jahresgangs liegt. Aufgrund dieser verschiedenen Zielsetzungen unterscheiden sie sich auch bzgl. der Verfügbarkeit und der Relevanz ihrer Eingangsdaten. Während für die Langfristsimulation Messwerte saisonal variierender Größen wie Lufttemperatur, Schneehöhen oder Grundwasserstände wichtig sind, sind für die Kurzfristvorhersage aktuelle Abflussmessungen die wichtigsten Indikatoren des aktuellen Gebietszustandes, und damit auch der Abflussbildung für die nahe Zukunft (NEARING et al., 2022). Abflussmessungen sind für operationelle Vorhersagen meist bis zum Vorhersagezeitpunkt verfügbar, und können daher als Eingangsgrößen für das Training von Vorhersagemodellen genutzt werden. Für die in der Zukunft liegenden Anwendungszeiträume liegen diese Daten allerdings nicht vor, im Gegensatz zu anderen Eingangsgrößen

wie Niederschlag oder Temperatur, für die meist Vorhersagen von Wetterdiensten zur Verfügung stehen. Dieses Problem kann für LSTM-Vorhersagemodelle auf zwei Arten gelöst werden, beide wurden im Rahmen dieser Studie untersucht: Rekursive LSTMs verwenden auch im Vorhersagezeitraum Abflusswerte als Eingangsgröße, und erzeugen diese selbst durch ein schrittweises (rekursives) Voranschreiten in der Zeit (Abb. 4, linke Spalte).

Dies entspricht der Anwendung prozessbasierter Modelle für die Hochwasservorhersage. Für LSTMs mit ihrer hohen Flexibilität und Sensibilität hinsichtlich der Trainingsdaten entsteht aus dieser Vorgehensweise allerdings ein Problem: Das LSTM wird mit gemessenen Abflüssen trainiert, aber mit selbst erzeugten Abflüssen betrieben. Wenn diese Datenkollektive voneinander abweichen ("Bias" der Abflussvorhersagen), kann das zu einer selbstverstärkenden Fehlerfortpflanzung und damit einer schnell sinkenden Vorhersagequalität führen (LAMB et al., 2016). Interessanterweise kann dieses Problem verkleinert werden, indem man die für das Training verwendeten Abflussdaten "verrauscht",

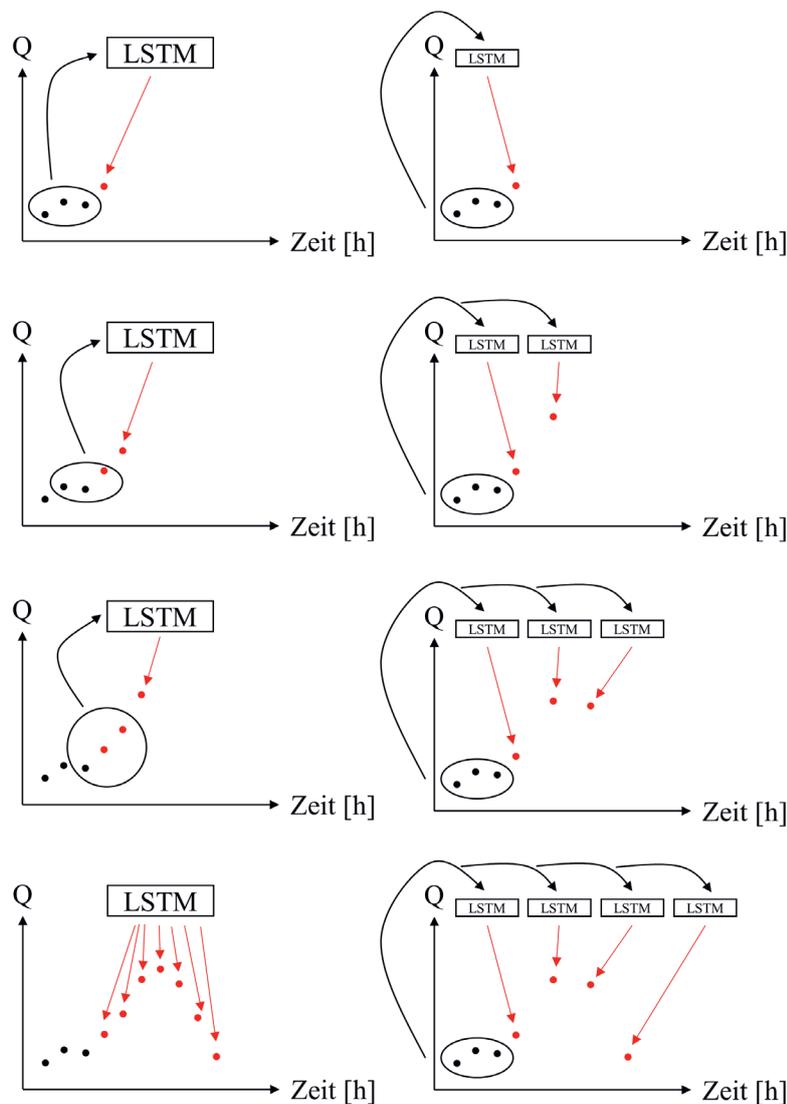


Abbildung 4

Arbeitsablauf des rekursiven LSTM (linke Spalte) und des multi-LSTM (rechte Spalte). LSTM-Ausgaben sind als rote Punkte gekennzeichnet. *Workflow of the recursive LSTM (left column) and the multi-LSTM (right column). LSTM outputs are marked as red points.*

d. h. sie mit einem kleinen, zufälligen Fehler in der Größenordnung des Vorhersagebias beaufschlagt. Damit lernt das LSTM von Daten, die den später bei der Modellanwendung verfügbaren Daten eher entsprechen als die ursprünglichen Messdaten (NEARING et al., 2022). Im Rahmen dieser Studie wurden die für das Training genutzten Abflussmessungen zeitschrittweise unabhängig mit einem gleichverteilten multiplikativen Fehlerterm im Wertebereich $[0,8, 1,2]$ verrauscht. Der Wertebereich – ein Hyperparameter – wurde iterativ aus dem Wertebereich $[0,5, 1,5]$ heraus durch Maximierung der Vorhersagegüte bestimmt. In Abbildung 5 ist dazu ein exemplarisches Beispiel zu sehen.

Für die Vorhersagetests wurden neben den rekursiven LSTMs auch noch eine zweite LSTM-Variante – multi-LSTMs – untersucht. Dabei wird für jede gewünschte Vorhersagetiefe im Vorhersagezeitraum jeweils ein separates LSTM trainiert, jeweils mit denselben meteorologischen Messungen und den Abflussmessungen bis zum Vorhersagezeitpunkt, und mit jeweils allen meteorologischen Vorhersagen bis zur jeweiligen Vorhersagetiefe im Vorhersagezeitraum. Der Arbeitsablauf eines multi-LSTM Ensembles ist in Abbildung 4, rechte Spalte dargestellt. Da die einzelnen Modelle des multi-LSTMs voneinander unabhängig operieren, entfällt das Problem der Fehlerfortpflanzung, dafür ist der Trainingsaufwand im Vergleich zum rekursiven LSTM höher, da statt nur einem viele LSTMs trainiert werden müssen. Um den Trainingsaufwand zu begrenzen, wurden daher im Rahmen dieser Studie nicht für jede Stunde der gewünschten Vorhersagetiefe (72 Stunden) LSTMs erstellt, sondern nur für die Vorher-

sagetiefen $\{1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36, 45, 54, 63, 72\}$ Stunden, und dazwischen linear interpoliert.

2.4.2 LARSIM

Für diese Studie wurden LARSIM-Modelle von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) zur Verfügung gestellt. Diese Modelle stehen flächendeckend für Baden-Württemberg zur Verfügung und werden wie in Kapitel 2.3 beschrieben für unterschiedliche Fragestellungen genutzt, insbesondere aber für die operationelle Hochwasservorhersage. Die landesweiten LARSIM-Modelle wurden anhand von ca. 200 Pegeln mit Messdaten des Zeitraums 1. November 1997 bis 9. Juni 2021 (> 23 Jahre) manuell kalibriert (MORETTI et al., 2022). Die Kalibrierung erfolgte nach den Maßgaben des entsprechenden Leitfadens für operationelle LARSIM-Modelle (HAAG et al. 2021). Dabei werden die Modelle nicht ausschließlich für die bestmögliche Wiedergabe des Abflusses am Pegel mithilfe einer einzelnen Zielfunktion (z. B. MSE, NSE) optimiert. Vielmehr werden neben den Ganglinien am Pegel unter anderem auch hydrologische Hauptwerte wie MNQ und MHQ, der realistische Verlauf der Bodenfeuchte, die Nachbildung des Base-Flow-Index als Maß für die Tiefenversickerung und die räumliche Konsistenz der Modellparameter einbezogen. Durch diese multikriterielle Kalibrierung erhält man in der Regel eine wesentlich robustere Parameterwahl als durch die reine Minimierung des MSE oder die Maximierung der NSE. Durch die Kalibrierung wird also nicht der minimale MSE oder die maximale NSE erreicht, sondern robuste, räumlich konsistente Modelle, die in der Regel auch eine gute Extrapolationsfähigkeit aufweisen. Es

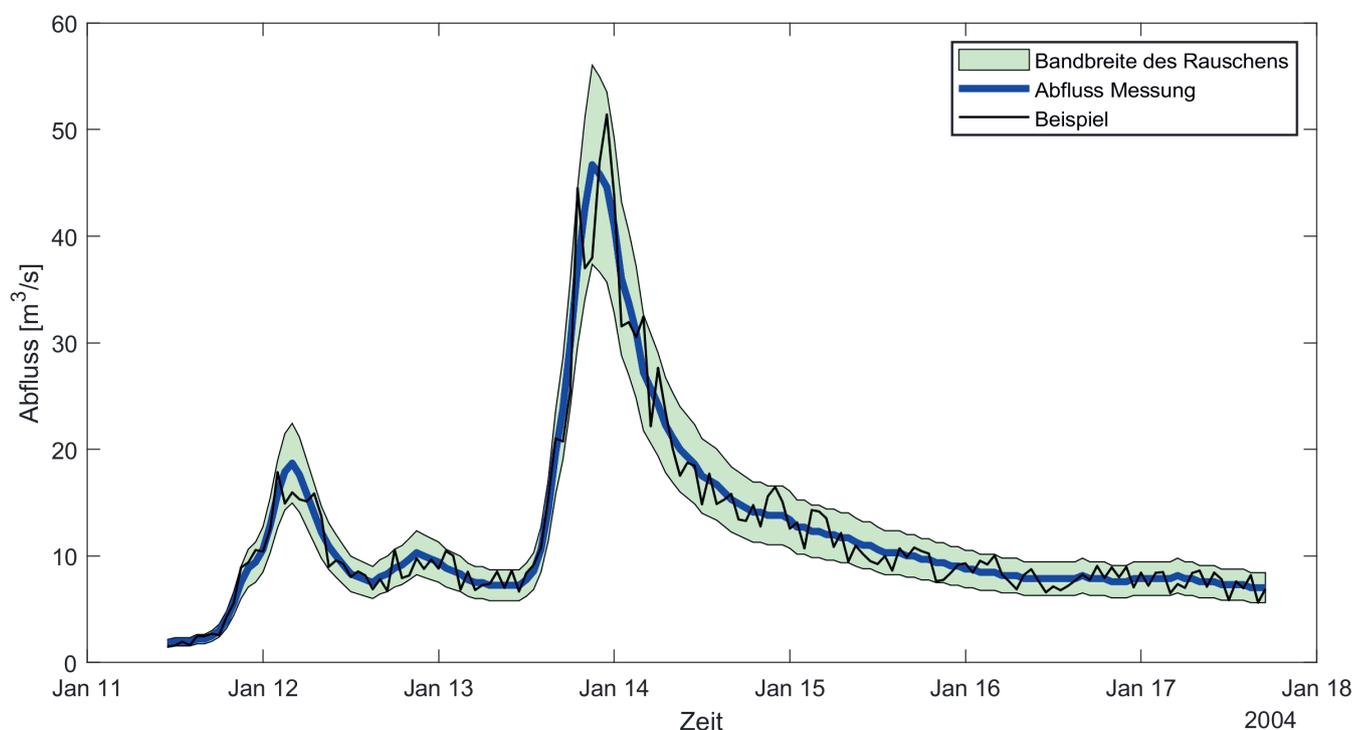


Abbildung 5

Beispiel für das Verrauschen von Eingangsdaten für das Training des rekursiven LSTMs. Die blaue Linie zeigt Original-Messwerte, das grüne Band den möglichen Wertebereich des Rauschens mit Faktoren aus dem Wertebereich $[0,8, 1,2]$, die schwarze Linie zeigt daraus beispielhaft eine Realisation. *Example of noisy input data for training of the recursive LSTM. The blue line shows original measurement values, the green band shows the possible value range of the noise with factors from the value range $[0,8, 1,2]$, the black line shows an example of actual noisy input used in the training.*

ist zu beachten, dass der für den Vergleich zwischen LARSIM und LSTM gewählte Zeitraum 1. Oktober 2016 bis 31. Mai 2021 innerhalb des LARSIM-Kalibrierungszeitraums liegt. Der Grund dafür ist, dass noch keine neueren Daten zur Verfügung standen. Wie in Kapitel 2.4.1 erwähnt wurden daher die LARSIM-Ergebnisse mit denen des LSTM-Hyperparameter-Trainings verglichen. Die quantitative Vergleichbarkeit zwischen LARSIM- und LSTM-Modellen ist also dadurch etwas eingeschränkt, dass LARSIM nicht streng hinsichtlich der bestmöglichen Nachbildung des Abflusses am Pegel optimiert wurde, und der vierjährige Vergleichszeitraum bei der Anpassung beider Modelle unterschiedlich berücksichtigt wurde. Kleinere Unterschiede in numerischen Gütemaßen sollten also nicht überinterpretiert werden. Trotz dieser Einschränkung kann der Vergleich mit den LARSIM-Ergebnissen zweifellos zur qualitativen Bewertung der LSTM-Modelle herangezogen werden.

2.4.3 Bewertung der Modellgüte

Für die Bewertung der Modellgüte von LARSIM- und der LSTM-Modelle bei den Simulationen wird die Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE) zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen an den vier Untersuchungspegeln über den gesamten Testzeitraum berechnet. Darüber hinaus wird auch die korrekte Wiedergabe von Hochwasserereignissen untersucht. Dazu werden für jeden Pegel die jeweils sechs größten Hochwasserereignisse im Testzeitraum ausgewählt und der jeweilige Scheitelabfluss bestimmt. Für Haubersbronn/Wieslauf traten in diesem Zeitraum nur drei relevante Hochwasserereignisse auf, so dass nur diese untersucht wurden. Aus den simulierten Abflussganglinien wird ebenfalls der zugehörige Scheitelabfluss bestimmt und mit den Messwerten verglichen: Weicht der simulierte vom gemessenen Scheitelabfluss um mehr als $\pm 25\%$ ab, so wird das Ereignis als unter- bzw. überschätzt kategorisiert, alle anderen Fälle gelten als korrekt.

Für die Bewertung der Vorhersagegüte werden für die ausgewählten Hochwasserereignisse stündliche 72-Stunden-Vorhersagen mit LARSIM und den LSTMs gerechnet. Dabei liegt der erste Vorhersagezeitpunkt jeweils kurz vor Ereignisbeginn, der letzte kurz nach Erreichen des Abflussscheitels, dazwischen liegen sie in stündlichem Abstand. Dann wird separat für jeden Pegel und jede Vorhersagetiefe, aber gemeinsam für alle Vorhersageläufe eines Modells, der NSE zwischen Vorhersage und Messwert bestimmt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Simulation

Für alle Untersuchungspegel sind die NSE- und KGE-Werte im gesamten Vergleichszeitraum für LARSIM und LSTM in Tabelle 2 aufgelistet. Da sich die Ergebnisse für NSE und KGE sehr ähneln, werden im Folgenden nur die NSE-Werte diskutiert. Im Mittel über alle Pegel liegt die Simulationsgüte für LARSIM bei 0,81 und für LSTM bei 0,85. Beide Modelle können damit als sehr gut bezeichnet werden. Die einzige Ausnahme bildet die LARSIM-Simulation für den Pegel Haubersbronn mit einem NSE-Wert von 0,69. Der Grund für diese Abweichung ist ein einzelnes Hochwasserereignis, das deutlich unterschätzt wurde. Beim direkten Vergleich zwischen LARSIM und LSTM zeigt sich, dass LSTM an drei von vier Pegeln eine bessere Simulationsgüte aufweist (fett markierte Werte in Tab. 2), die Unterschiede aber nur gering sind. Wenngleich die kleinen NSE-Unterschiede vor dem Hintergrund

der unterschiedlichen Optimierung der beiden Modelle nicht überbewertet werden sollten (siehe Kapitel 2.4.2), kann festgehalten werden, dass die LSTM ähnlich gute Simulationsgüten erreichen wie LARSIM.

Zum weiteren Vergleich sind in Abbildung 6 für alle Untersuchungspegel Streudiagramme zwischen den Messwerten und den LARSIM- bzw. LSTM-Simulationen im gesamten Vergleichszeitraum abgebildet (rechte Spalte). Auch hier zeigt sich eine gute Wiedergabe der Messwerte durch die Simulationen im gesamten Abflussspektrum (die Punkte liegen meist nahe an der ersten Winkelhalbierenden), lediglich bei Haubersbronn ist das einzelne durch LARSIM stark unterschätzte Hochwasser als horizontale Punktreihe zu erkennen. In der linken Spalte sind exemplarische Zeitreihen gemessener und simulierter Abflüsse abgebildet, aus denen hervorgeht, dass die beobachtete Abflussdynamik inklusive Hoch- und Niedrigwasserphasen sowohl durch LARSIM als auch LSTM ähnlich gut abgebildet wird.

Für die Beurteilung der Simulationsgüte bei Hochwasser sind in Tabelle 3 für insgesamt 21 Hochwasserscheitel – die jeweils sechs höchsten Hochwasser an drei Pegeln und die drei höch-

Tabelle 2

Simulation quality (Nash-Sutcliffe efficiency NSE and Kling-Gupta efficiency KGE) for LARSIM and LSTM in the entire comparison period. For each catchment, the higher (= better) value in the LARSIM-LSTM comparison is marked in bold.

Pegel	LARSIM NSE	LSTM NSE	LARSIM KGE	LSTM KGE
Lautenhof/Enz	0,84	0,89	0,72	0,85
Schwäbisch Gmünd/Rems	0,86	0,80	0,92	0,72
Haubersbronn/Wieslauf	0,69	0,84	0,81	0,82
Schorndorf/Rems	0,87	0,90	0,91	0,92

Tabelle3

Hit rate of LARSIM and LSTM for peak discharges from 21 selected flood events in the comparison period (6 events per gauge, except Haubersbronn with only 3 events).

		LSTM		
		Unter-schätzung	Korrekt	Über-schätzung
LARSIM	Gesamt	7	12	2
	Unterschätzung	8	2	0
	Korrekt	13	5	2
	Überschätzung	0	0	0

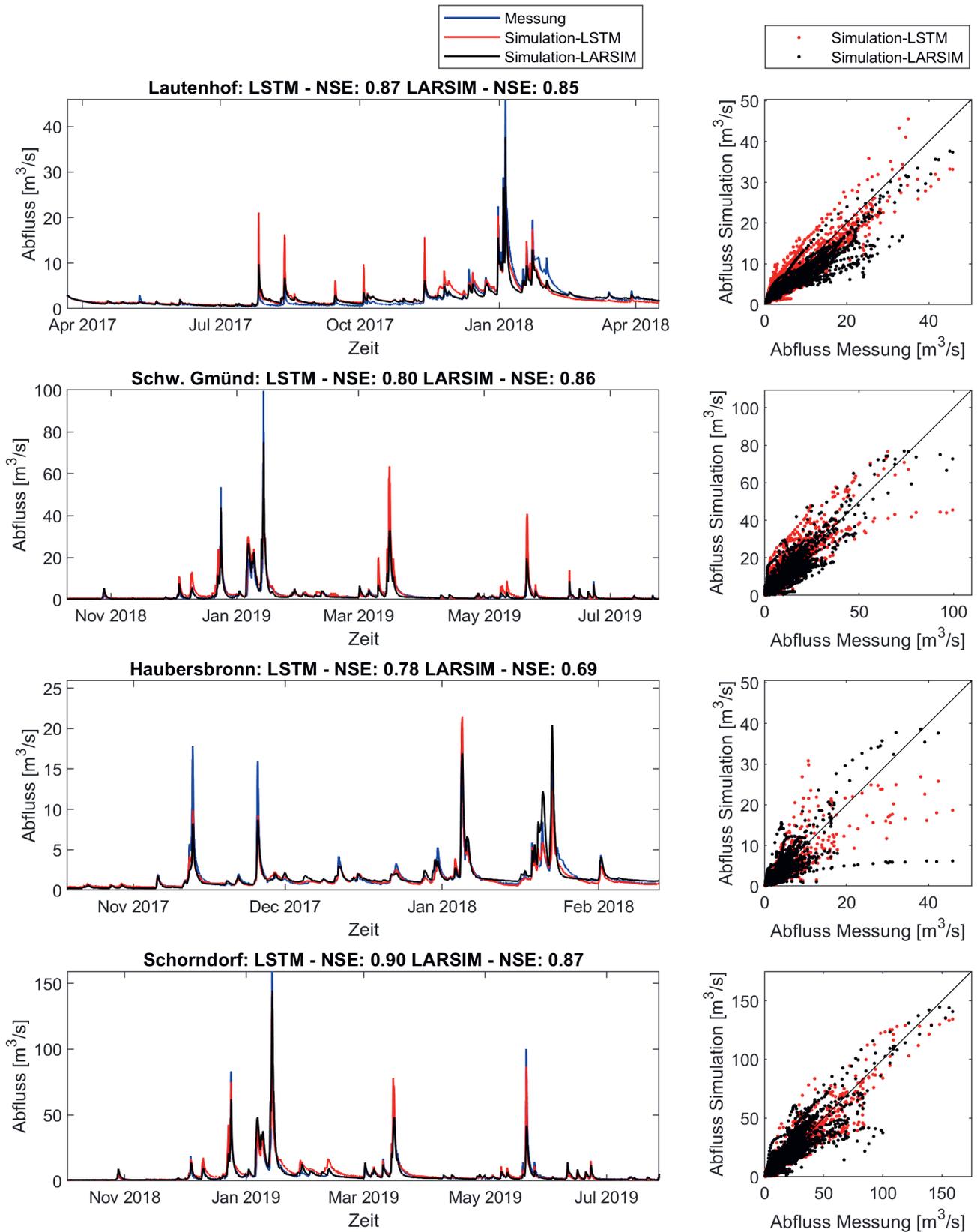


Abbildung 6

Linke Spalte: Exemplarische Abflussganglinien der vier Untersuchungspegel. Messwerte (blau), mit LARSIM simuliert (schwarz) und mit LSTM simuliert (rot). Rechte Spalte: Abfluss-Streudiagramm mit Messwerten gegen LARSIM-Simulationen (schwarz) und gegen LSTM-Simulationen (rot) für den gesamten Vergleichszeitraum.

Left column: Example of streamflow hydrographs of the four catchments. Measurements (blue), simulated with LARSIM (black) and simulated with LSTM (red). Right column: Scatter plot of measured streamflow vs. LARSIM simulations (black) and LSTM simulations (red) for the entire comparison period.

ten Hochwasser am Pegel Haubersbronn – die LARSIM- und LSTM- Simulationen der Scheitelabflüsse als kategorische Kontingenztabelle abgebildet (vgl. Kap. 2.4.3). Nach dieser Klassifikation simuliert LARSIM 13 der Scheitelabflüsse korrekt, unterschätzt acht und überschätzt keinen. Es zeigt sich also eine mehrheitlich korrekte Reproduktion der Scheitelabflüsse und eine Tendenz zur Unterschätzung. Bei LSTM liegt der Anteil korrekt simulierter Scheitelabflüsse mit 12 etwas niedriger als bei LARSIM. Wie bei LARSIM ist auch bei LSTM der Anteil unterschätzter Fälle (sieben) größer als der Anteil überschätzter Fälle (zwei). Es zeigt sich also sowohl für LARSIM als auch LSTM eine mehrheitlich korrekte Reproduktion der Scheitelabflüsse.

3.2 Vorhersage

3.2.1 Rekursives LSTM vs. multi-LSTM

In Kapitel 2.4.1.2 wurden zwei mögliche LSTM-Modellvarianten für die Vorhersage vorgestellt, rekursive LSTM und multi-LSTM. Um zu entscheiden, welche der Varianten verwendet werden soll,

wurden beide Modelle an allen Pegel trainiert und anschließend Vorhersagetests für die jeweils sechs höchsten Hochwasserereignisse pro Pegel durchgeführt. Für Haubersbronn wurden nur die höchsten drei Hochwasserereignisse genutzt (siehe Kap. 2.4.3). Daraus wurden NSE-Werte für jede Vorhersagetiefe berechnet (siehe Kap. 2.4.3). Für das rekursive LSTM lagen die NSE-Werte über alle Vorhersagetiefen im Bereich $[0,3, 0,6]$, für das multi-LSTM lagen alle über $0,75$. Das multi-LSTM ist also deutlich besser und wurde für die weiteren Vorhersagetests verwendet. Das Ergebnis zeigt, dass auch das künstliche Verrauschen der Abflussmessungen das Problem der Fehlerfortpflanzung nicht vollständig beheben konnte. Zur Verdeutlichung sind dazu in Abbildung 7 für ein exemplarisches Hochwasserereignis am Pegel Lautenhof/Enz und einem Vorhersagezeitpunkt kurz vor dem Beginn des eigentlichen Hochwasserereignisses die Vorhersageganglinien beider Modellvarianten dargestellt. Für die ersten Vorhersageschritte sind beide Vorhersagen noch sehr ähnlich, dann aber unterschätzt das rekursive LSTM den Abflussanstieg und behält durch Fehlerfortpflanzung diese Unterschätzung im weiteren Verlauf bei.

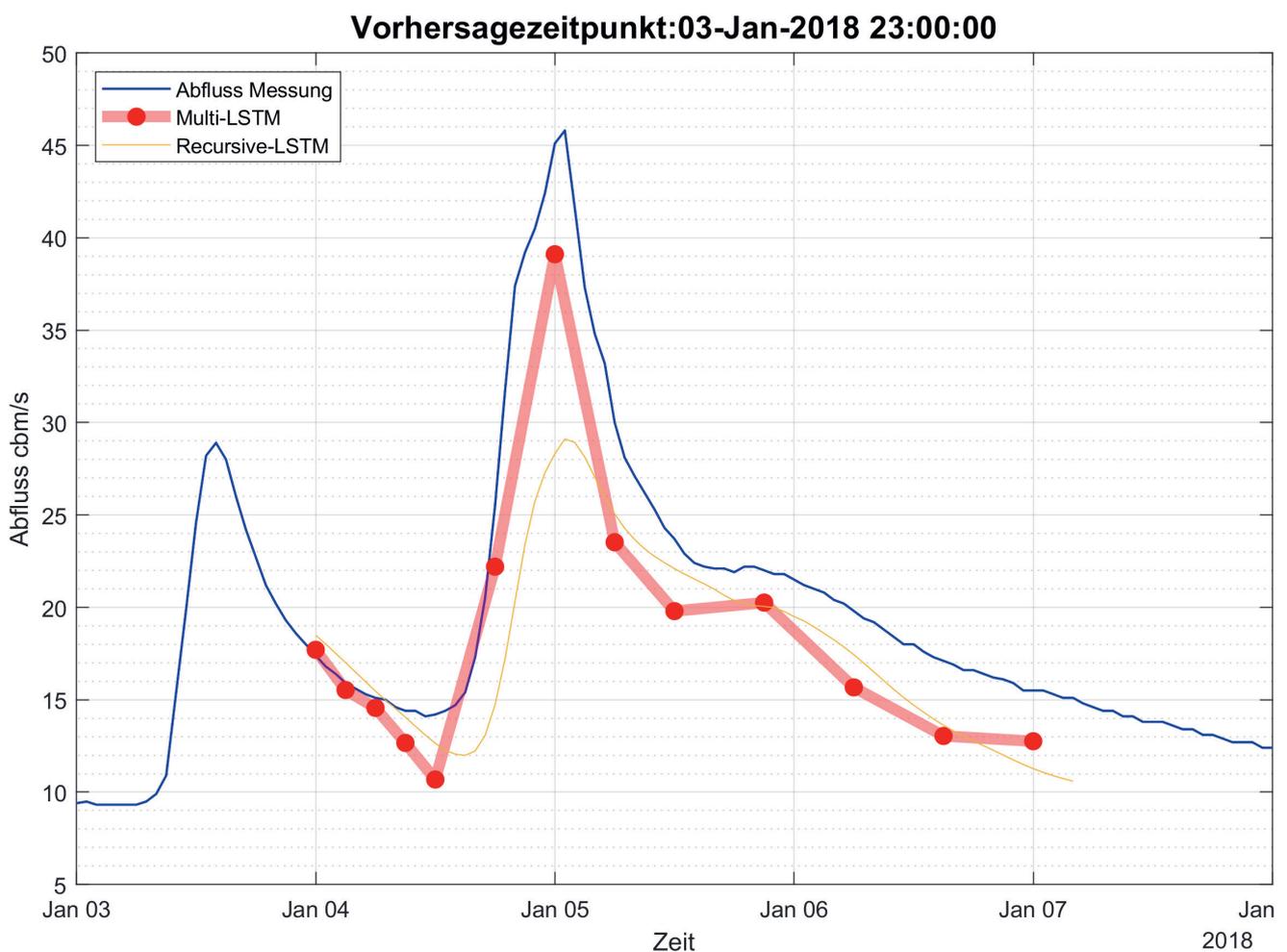


Abbildung 7
 Vorhersageganglinien für ein Hochwasserereignis am Pegel Lautenhof/Enz, erstellt mit rekursivem LSTM (gelb) und multi-LSTM (rot, die Punkte markieren die berechneten Vorhersagetiefen, die breite Linie markiert eine lineare Interpolation).
 Forecast hydrographs for a flood event at gauge Lautenhof/Enz, produced by recursive LSTM (yellow) and multi-LSTM (red, the dots mark the predicted forecast depths, the wide line is a linear interpolation).

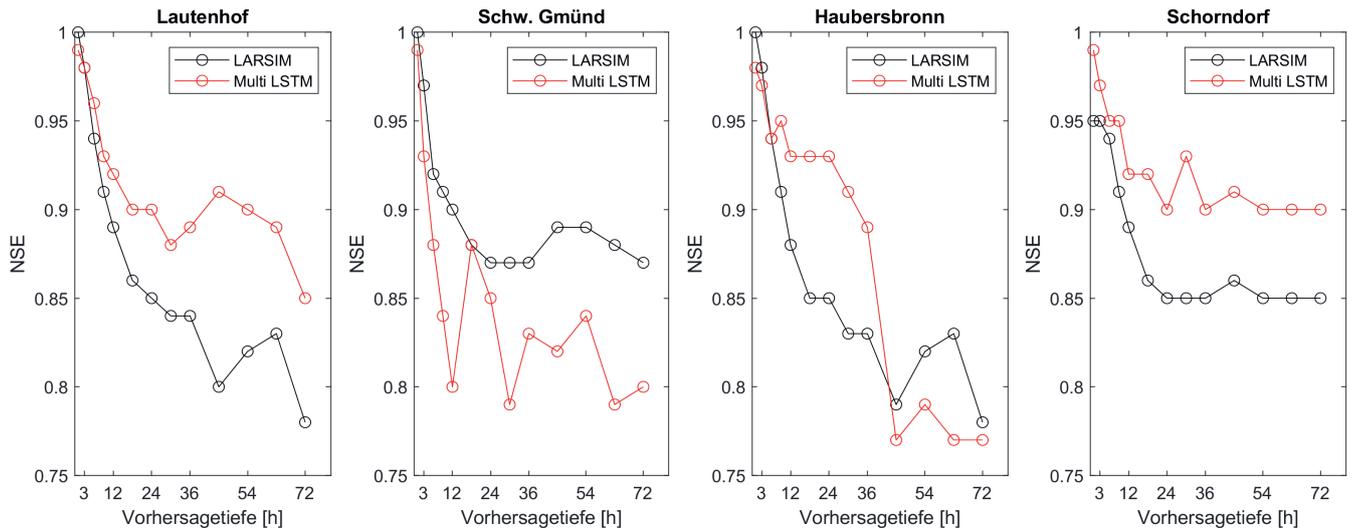


Abbildung 8

Mittlere NSE-Werte von LARSIM und multi-LSTM als Funktion der Vorhersagetiefe für Vorhersagetests von 21 ausgewählten Hochwasserereignissen im Vergleichszeitraum.

Average NSE values for LARSIM and multi-LSTM forecasts as a function of forecast depth for 21 selected flood events in the comparison period.

3.2.2 LARSIM vs. multi-LSTM

Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, erfolgte der Vergleich von LARSIM und multi-LSTM bezüglich ihrer Vorhersagequalität anhand der 21 ausgewählten Hochwasserereignisse im Vergleichszeitraum, und als Funktion der Vorhersagetiefe. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Wie zu erwarten nimmt mit zunehmender Vorhersagetiefe die Vorhersagequalität für alle Pegel und beide Modelle ab. Dies liegt nicht an der abnehmenden Qualität der Antriebsdaten, da, wie in Kapitel 2.4 erläutert, auch im Vorhersagezeitraum Messdaten verwendet wurden. Vielmehr hängt es mit dem abnehmenden Informationsgehalt der nur bis zum Vorhersagezeitpunkt verfügbaren Abflussmessungen zusammen, und wie gut jedes Modell den Gebietszustand aus diesen Messungen extrahieren und für die Vorhersage nutzen kann. Die Vorhersagequalität für beide Modelle bleibt selbst für die 72-Stunden-Vorhersage über einem NSE-Wert von 0,75 und kann damit insgesamt als hoch bezeichnet werden. Im direkten Vergleich der Modelle zeigt sich ein insgesamt ausgeglichenes Bild. An den Pegeln Lautenhof und Schorndorf liefert das LSTM bessere Vorhersagen, am Pegel Schwäbisch Gmünd LARSIM, am Pegel Haubersbronn wechselt die Vorhersagequalität mit der Vorhersagetiefe.

Zum weiteren Vergleich von LARSIM und multi-LSTM sind in Abbildung 9 Vorhersagen für das jeweils höchste im Testzeitraum beobachtete Hochwasser an jedem Untersuchungspegel dargestellt, für jeweils drei charakteristische Vorhersagezeitpunkte: vor dem Ereignis, zu Ereignisbeginn, und am Scheitelabfluss. Am Pegel Lautenhof wird die Hochwasserspitze durch LARSIM korrekt vorhergesagt, aber durch das multi-LSTM leicht unterschätzt. Das Ereignis zeigt jedoch, dass beide Modelle auch mehrgipflige Ereignisse vorhersagen können. An den weiteren Pegeln wird der Hochwasserverlauf zu allen Vorhersagezeitpunkten von beiden Modellen im Wesentlichen korrekt vorhergesagt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Studie war eine Untersuchung des Potenzials maschineller Lernverfahren für die hydrologische Simulation und Vorhersage. Dazu wurden Long Short-Term Memory Netzwerke (LSTMs) genutzt. Sie besitzen im Gegensatz zu einfachen neuronalen Netzwerken ein "Gedächtnis", was sie für die Simulation von Zeitreihen prädestiniert. Für vier exemplarische Pegel in Baden-Württemberg wurden LSTM-Modelle auf Basis hydro-meteorologischer Eingangsgrößen aufgestellt und mehrjährige stündliche Abflusssimulationen und Abfluss-Vorhersagetests auf Basis gemessener meteorologischer Antriebsdaten erstellt. Diese wurden mit Abflussmessungen an den Pegeln sowie mit Abflusssimulationen und -vorhersagen des etablierten prozessbasierten Wasserhaushaltsmodells LARSIM verglichen.

Bezüglich des Aufbaus von LSTM-Modellen für Simulation und Vorhersage lassen sich die wichtigsten Ergebnisse wie folgt darstellen: Die Simulationsqualität verbessert sich deutlich, wenn man neben den ursprünglichen Antriebsdaten zusätzlich auch aggregierte Zeitreihen verwendet, da darin Informationen über die langfristige Dynamik relevanter Wasserhaushaltsgrößen enthalten sind. Die Wiedergabe von Hochwasserabflüssen verbessert sich wiederum deutlich, wenn man die Standard-Zielfunktion MSE (mittlerer quadratischer Fehler) um einen Term erweitert, der den höchsten aufgetretenen Fehler zusätzlich gewichtet.

Bezüglich der Nutzung von LSTMs für Langfristsimulationen zeigt sich, dass sie sehr gut geeignet und qualitativ mit LARSIM-Simulationen vergleichbar sind: Beide Modelle erreichen – mit Ausnahme von LARSIM an einem Pegel – Nash-Sutcliffe Effizienzen (NSE) von 0,80 oder besser. Bei der Interpretation der Modellgüten ist zu beachten, dass sie mit Daten aus einem Zeitraum berechnet wurden, der für LARSIM einen (kleinen) Teil des Kalibrierungszeitraums umfasst, und für die LSTM-Modelle

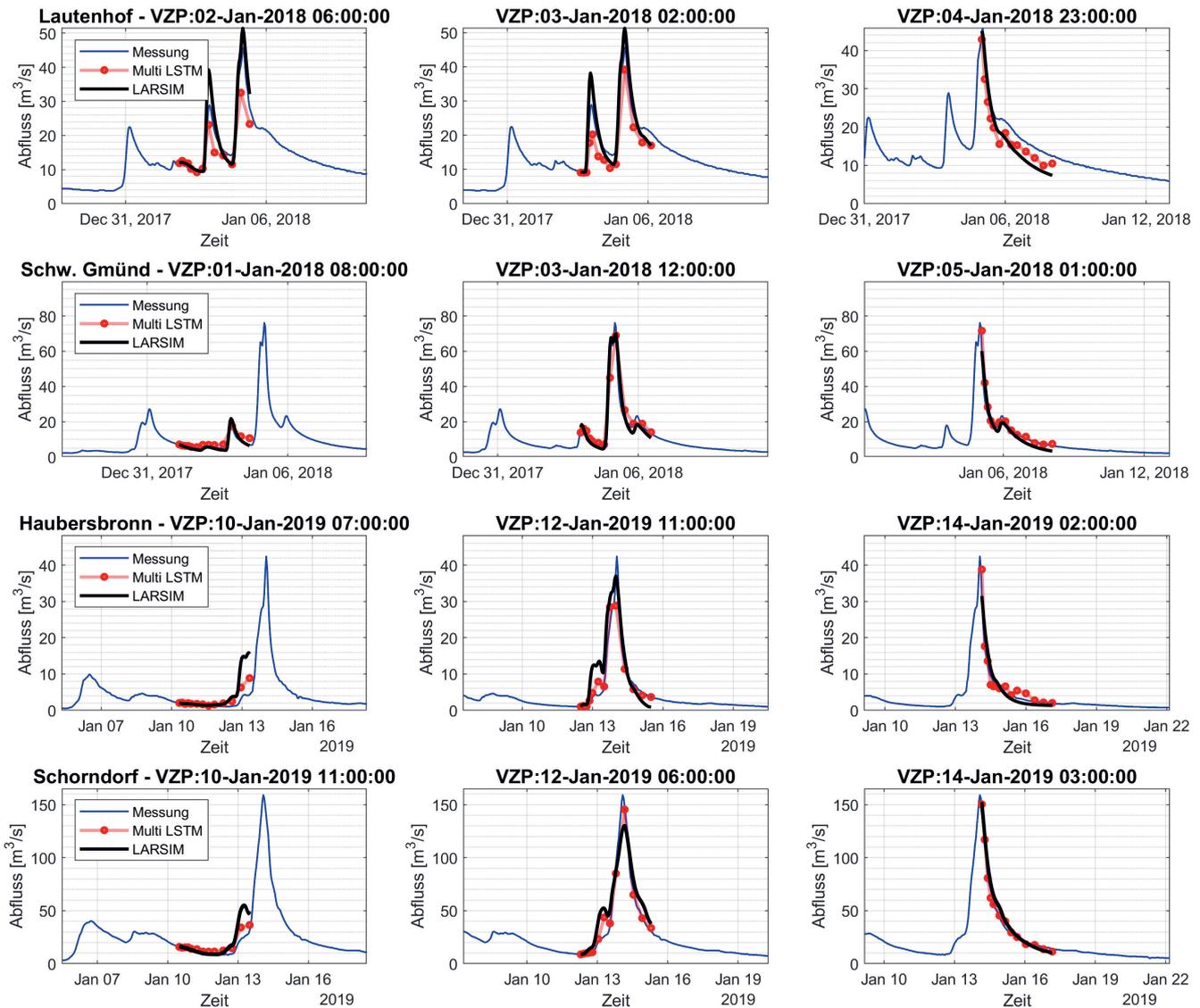


Abbildung 9

Vorhersagen mit LARSIM und multi-LSTM für das jeweils höchste beobachtete Hochwasserereignis an allen Testpegeln (Zeilen). Gezeigt sind 72 Stunden-Vorhersagen zu jeweils drei charakteristischen Vorhersagezeitpunkten (Spalten): vor dem Ereignis, zu Ereignisbeginn, am Scheitelabfluss. Die roten Punkte für das multi-LSTM markieren die berechneten Vorhersagetiefen.

Forecasts by LARSIM and multi-LSTM for the highest observed flood event at each test gauge (rows). 72-hour forecasts at three characteristic forecast times (columns): before the event, at the onset of the event, and at the flood peak. The red points for the multi-LSTM are the calculated forecast depths.

aus Gründen der Vergleichbarkeit mit LARSIM den Zeitraum des Hyperparameter- Trainings. Der Grund dafür liegt darin, dass LARSIM bereits vor dieser Studie umfassend und mit allen verfügbaren Daten für die Hochwasservorhersage kalibriert wurde, und keine weiteren Daten für eine völlig unabhängige Validierung vorlagen. Es ist davon auszugehen, dass die Gütemasse beider Modelle für einen Validierungsdatensatz etwas unter den hier gezeigten liegen. Bewertet man die Modelle nur im Hinblick auf die korrekte Wiedergabe von Hochwasser-Scheitelabflüssen, zeigen auch hier LSTMs und LARSIM gute Übereinstimmungen mit den Messwerten. Bei beiden Modellen zeigt sich eine gewisse Tendenz zur Unterschätzung der Scheitel.

Für die Vorhersage wurden zwei LSTM-Varianten untersucht: rekursive LSTMs, die ihre Modellausgabe als Eingangsgröße

für den nächsten Zeitschritt verwenden, und multi-LSTMs, bei denen für jede Vorhersagetiefe ein separates Modell aufgestellt wird. Die multi-LSTMs stellten sich als die klar bessere Variante heraus, da die bei rekursiven LSTMs auftretende Fehlerfortpflanzung die Vorhersagequalität verschlechtert. Bezüglich der Nutzung für die Vorhersage zeigte sich, dass sowohl LSTMs, als auch LARSIM eine hohe Vorhersagequalität erreichen. Bei der Vorhersage der höchsten Hochwasserereignisse an den Untersuchungspegeln lag der NSE-Wert für beide Modelle selbst für die 72-Stunden-Vorhersage über 0,75. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich bei den hier durchgeführten Modellläufen um Vorhersagetests mit gemessenen Antriebsdaten handelt. Für Modellläufe mit vorhergesagten Antriebsdaten ist eine niedrigere Vorhersagequalität zu erwarten.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass LSTMs in den hier gezeigten Untersuchungen für die Simulation und Vorhersage des Abflusses an Pegeln qualitativ ähnlich gute Ergebnisse erzielen wie das etablierte prozessbasierte Modell LARSIM. Es konnte damit gezeigt werden, dass Methoden des maschinellen Lernens ein großes Potenzial für die hydrologische Simulation und Vorhersage haben.

Um dieses Potenzial weiter auszuloten und auszuschöpfen, bieten sich weitere Untersuchungen an:

A) Verwendung von meteorologischen Vorhersagen für das Training der datenbasierten Modelle. Ausgereifte prozessbasierte Modelle wie LARSIM reagieren bei geeigneter Kalibrierung in der Regel robust auf Unsicherheiten oder systematische Fehler der meteorologischen Vorhersagen. Inwieweit dies auch auf die hier abgeleiteten multi-LSTMs zutrifft muss noch geklärt werden. Eine Möglichkeit für die bestmögliche Anpassung der multi-LSTMs mit realen meteorologischen Vorhersagen besteht darin, die datenbasierten Modelle mit kombinierten Mess- und Vorhersagedaten zu trainieren, so dass sie systematische Fehler der Wettervorhersage modellintern kompensieren können.

B) In dieser Studie wurde für jedes Untersuchungsgebiet ein separates LSTM aufgestellt. Für große, genestete Einzugsgebiete ist es aber – analog zu prozessbasierten Modellen – denkbar, über das Gewässernetz sequentiell verknüpfte LSTMs aufzustellen, womit ggf. Rechenzeiten verkürzt und die Modellqualität verbessert werden kann.

C) Die Kombination von Prozesswissen und dem Lernen aus Daten in hybriden Modellen wird derzeit als der vielversprechendste Ansatz für die Weiterentwicklung hydrologischer Modelle angesehen (REICHSTEIN et al., 2019; KARPATNE et al., 2017; RAISSI et al., 2019). Hier sind unter anderem folgende Varianten denkbar: Nutzung von ML-Modellen als Postprozessor prozessbasierter Modelle, Nutzung von Zustandsgrößen prozessbasierter Modelle als Eingangsgrößen für ML-Modelle, Trainieren von ML-Modellen als recheneffizientes Surrogat prozessbasierter Modelle, um z. B. Ensemble-Wettervorhersagen effizient nutzen zu können.

Zweifellos sollten die Möglichkeiten von datenbasierten Modellen in der Hydrologie zukünftig weiter untersucht und in die wasserwirtschaftliche Praxis überführt werden. Dabei müssen auch die Grenzen und Probleme dieser Ansätze benannt, analysiert und soweit möglich behoben werden. Insbesondere sollen und können prozessbasierte Modelle nicht vollständig durch datenbasierte Modelle ersetzt werden, zumal viele analytische Fragestellungen mit datenbasierten Modellen (noch) nicht beantwortet werden können. Vielmehr hat sich in den datenbasierten Modellen und insbesondere in LSTM eine wichtige Ergänzung der prozessbasierten hydrologischen Modellierung ergeben, der zukünftig mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Conclusions and Outlook

The aim of this study was to investigate the potential of machine learning methods for hydrological simulation and forecasting. Long Short-Term Memory Networks (LSTMs) were used for this purpose. In contrast to simple neural networks, they have a "memory", which makes them ideal candidates for time-series

simulations. LSTM models based on hydro-meteorological input variables were set up for four exemplary gauging stations in Baden-Württemberg and applied for multi-year hourly streamflow simulations and forecast tests (72-hour forecasts based on measured meteorological forcing data). These were compared with streamflow measurements at the gauges and with streamflow simulations and forecasts from the process-based water balance model LARSIM.

Regarding the construction of LSTM models for simulation and forecasting, the most important outcomes were: The simulation quality improves significantly if, in addition to the original forcing data, aggregated time series are also used, as they contain information about the long-term dynamics of relevant water balance variables. Further, the representation of flood events is significantly improved when the standard objective function MSE (mean square error) is expanded to include a term that additionally weights the highest error.

Regarding the use of LSTMs for long-term simulations, it was shown that they are very suitable and qualitatively comparable to LARSIM simulations: Both models achieve – with the exception of LARSIM at one catchment – Nash-Sutcliffe efficiencies (NSE) of 0.8 or better. When interpreting the model qualities, it should be noted that the NSE values were calculated with data from a period that includes a (small) part of the calibration period of LARSIM and the period of hyperparameter training for the LSTM models (for comparability reasons with LARSIM). The reason for this is that LARSIM had already been extensively calibrated with all available data for flood forecasting before this study, and no further data was available for a completely independent validation. It can be assumed that the quality measures of both models for a validation dataset are slightly lower than those shown here. If the models are only evaluated regarding the correct representation of flood events, LSTMs and LARSIM also show good agreement with the measured values. In both models there is a tendency to underestimate the peaks.

For short-term forecasting, two LSTM variants were investigated: Recursive LSTMs, which use their model output as an input for the next time step, and multi-LSTMs, where separate models are set up for each forecast depth. The multi-LSTMs were clearly superior, most likely as the error propagation that occurs in the Recursive LSTMs worsens the forecast quality. Considering their usability for forecasting, it was shown that both LSTMs and LARSIM achieve a high forecast quality: When forecasting the highest flood events at the stations, the NSE values for both models were above 0.75, even for the 72-hour forecast. When interpreting these results, it should be kept in mind that the experiments were carried out with measured meteorological forcing data; a somewhat lower prediction quality should be expected under operational conditions, i.e. when using forecasted forcing data.

Overall, it can be concluded that the LSTMs in this study for the simulation and forecasting of streamflow achieve qualitatively similar results than the established process-based model LARSIM. We were thus able to show that machine learning methods have great potential for hydrological simulation and forecasting.

In order to further explore and exploit this potential, further investigation topics are possible: A) Use of meteorological forecasts for training the data-based models. When properly

calibrated, sophisticated process-based models such as LARSIM usually respond robustly to uncertainties or systematic errors in meteorological forecasts. It still needs to be explored to what extent this also applies to the multi-LSTMs. One possibility for an optimal adaptation of multi-LSTMs to real meteorological forecasts is to train them with combined measurement and forecast data so that they can learn and compensate for systematic errors in the weather forecast. B) In this study, separate LSTMs were established for each catchment. For large, nested catchment areas, however, it is conceivable – analogous to process-based models – to set up LSTMs linked sequentially across the river network, which may shorten calculation times and improve the model quality. C) The combination of process knowledge and learning from data in hybrid models is currently viewed as the most promising approach for the further development of hydrological models (REICHSTEIN et al., 2019; KARPATNE et al., 2017; RAISSI et al., 2019). The following variants are conceivable here, amongst others: use of ML models as post-processors of process-based models, using the state variables of process-based models as input variables for ML models, training of ML models as a computationally efficient surrogate of process-based models, for example for efficient ensemble forecasting.

Undoubtedly, the possibilities of data-based models in hydrology should be further investigated in the future and implemented in water management practice. The limitations and problems of these approaches must also be identified, analysed and, if possible, remedied. In particular, in our opinion, process-based models should not and cannot be completely replaced by data-based models, especially since many analytical questions cannot (yet) be answered with data-based models. Rather, we see data-based models and especially LSTMs as an important addition to the process-based hydrological modelling that should receive more attention in the future.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

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

Anschriften der Verfasser

Orhan Delil Tanrikulu, M.Sc.
 PD Dr.-Ing. Uwe Ehret
 Dr. rer. nat. Ralf Loritz
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Wasser und Umwelt
 Kaierstraße 12, 76131 Karlsruhe
 orhan.tanrikulu@kit.edu
 uwe.ehret@kit.edu
 ralf.loritz@kit.edu

Dr.-Ing. Ingo Haag
 HYDRON Ingenieurgesellschaft für
 Umwelt und Wasserwirtschaft mbH
 Ritterstraße 9, 76137 Karlsruhe
 ingo.haag@hydron-gmbh.de

Dipl.-Ing. Ute Badde
 LUBW Landesanstalt für
 Umwelt Baden-Württemberg
 Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe
 ute.badde@lubw.bwl.de

Literaturverzeichnis

- ADDOR, N., A. J. NEWMAN, N. MIZUKAMI & M. P. CLARK (2017): The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21 (10), 5293–5313.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell Larsim – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Band 11.
- BREMICKER, M., G. BRAHMER, N. DEMUTH, F.-K. HOLLE & I. HAAG (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendung. – *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6 (9), 509–519.
- FRAME, J., F. KRATZERT, D. KLOTZ, M. GAUCH, G. SHALEV, O. GILON, L. QUALLS, H. GUPTA & G. NEARING (2022): Deep learning rainfall-runoff predictions of extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 3377–3392.
- FROCHTE, J. (2020): *Maschinelles Lernen. Grundlagen und Algorithmen in Python*. Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-46144-4.
- GAUCH, M., F. KRATZERT, D. KLOTZ, D. NEARING, J. LIN & S. HOCHREITER (2021): Rainfall-runoff prediction at multiple timescales with a single Long Short-Term Memory network. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2045–2062.
- HAAG, I. & A. LUCE (2008): LARSIM-WT: an integrated water-balance and heat-balance model to simulate and predict stream water temperatures. *Hydrological Processes* 22, 1046–1056.
- HAAG, I., M. JOHST, A. SIEBER & M. BREMICKER (2021): Leitfaden zur Kalibrierung von räumlich hoch aufgelösten LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage. 2. Auflage, Stand: 6. April 2021. Herausgegeben von der LARSIM-Entwicklergemeinschaft. <https://larsim.info/>.
- HAAG, I., J. KRUMM, D. AIGNER, A. STEINBRICH & M. WEILER (2022): Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 66, (1), 6–27, DOI: 10.5675/HyWa_2022.1_1.
- HAAG, I., K. TELTSCHER & D. AIGNER. (2023): 2-Grad-Ziel für unsere Bäche – Wassertemperatur und Beschattung. *KLIWA-Kurzbericht* 2023: 44 S. <https://www.kliwa.de/publikationen-kurzberichte.htm>.
- HEATON, J. (2008): *Introduction to neural networks for java*, 2nd edition (2nd). Heaton Research, Inc, ISBN 9781604390087.
- HEBB, D.O. (1949): *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*, New York:Wiley.
- HOCHREITER, S. & J. SCHMIDHUBER (1997): Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9 (8), 1735–1780.
- HU, C., Q. WU, H. LI, S. JIAN, N. LI & Z. LOU (2018): Deep learning with a long short term memory networks approach for rainfall-runoff simulation. *Water*, 10 (11), 1543.
- HUNT, K.M.R., G.R. MATTHEWS, F. PAPPENBERGER & C. PRUDHOMME (2022): Using a long short-term memory (LSTM) neural network to boost river streamflow forecasts over the western United States, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26(21), 5449–5472.
- ISHIKAWA, M., I. HAAG, J. KRUMM, K. TELTSCHER & A. LORKE (2021): The effect of stream shading on the inflow characteristics in a downstream reservoir. *River Research and Applications*, Volume37, Issue7, S. 943–954.
- JOSEPH, V.R. (2022), Optimal ratio for data splitting, *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 15(4), 531–538.
- KANG, K.-W., C.-Y. PARK & J.-H. KIM (1993). Neural network and its application to rainfall-runoff forecasting, *Korean journal of hydrosciences*, 4, 1–9.

- KARPATNE, A., G. ATLURI, J.H. FAGHMOUS, M. STEINBACH, A. BANERJEE, A. GANGULY, S. SHEKHAR, N. SAMATOVA & V. KUMAR (2017): Theory-Guided Data Science: A New Paradigm for Scientific Discovery from Data, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 29(10), 2318-2331.
- KRATZERT, F., D. KLOTZ, C. BRENNER, K. SCHULZ & M. HERRNEGGER (2018): Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (11), 6005–6022.
- KRATZERT, F., D. KLOTZ, M. HERRNEGGER, A.K. SAMPSON, S. HOCHREITER, & G.S. NEARING (2019): Toward Improved Predictions in Ungauged Basins: Exploiting the Power of Machine Learning, *Water Resources Research*, 55(12), 11344-11354.
- KRATZERT, F., M. GAUCH, G. NEARING, S. HOCHREITER & D. KLOTZ (2021): Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit Long Short-Term Memory (LSTM), *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73(7), 270-280.
- LAMB, A., A. GOYAL, Y. ZHANG, S. ZHANG, A. COURVILLE & Y. BENGIO (2016): Professor forcing: A new algorithm for training recurrent networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.09038>.
- LEG – LARSIM Entwicklergemeinschaft (2023): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Stand 6. April 2023. Abrufbar auf <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>.
- LUCE, A., I. HAAG & M. BREMICKER (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (2), 58–66.
- LUDWIG, P., F. EHMELE, M.J. FRANCA, S. MOHR, A. CALDAS-ALVAREZ, J.E. DANIELL, U. EHRET, H. FELDMANN, M. HUNDHAUSEN, P. KNIPPERTZ, K. KÜPFER, M. KUNZ, B. MÜHR, J.G. PINTO, J. QUINTING, A.M. SCHÄFER, F. SEIDEL & C. WISOTZKY (2023): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 2: Historical context and relation to climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(4), 1287-1311.
- MAIER, H.R., S. GALELLI, S. RAZAVI, A. CASTELLETT, A. RIZZOLI, I.N. ATHANASIADES, M. SÁNCHEZ-MARRÉ, M. ACUTIS, W. WU & G.B. HUMPHREY (2023): Exploding the myths: An introduction to artificial neural networks for prediction and forecasting. *Environmental Modelling & Software*, 167, 105776.
- MCCULLOCH, W.S. & W. PITTS (1943): A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin and Mathematical Biophysics* 5, 115–133.
- MORETTI, G., K. TELTSCHER, J. REGENAUER, J. LIER, M. SEIBERT & I. HAAG. (2022): Nachkalibrierung der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle Baden-Württemberg. HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht).
- MULVANY, T.J. (1851): On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and flood discharges in a given catchment. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol. IV, pt. II, pp. 18-33, 1851, 4 (2).
- NEARING, G.S., D. KLOTZ, J.M. FRAME, M. GAUCH, O. GILON, F. KRATZERT, A.K. SAMPSON, G. SHALEV & S. NEVO (2022): Technical note: Data assimilation and autoregression for using near-real-time streamflow observations in long short-term memory networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26(21), 5493-5513.
- NEVO, S., E. MORIN, A. GERZI ROSENTHAL, A. METZGER, C. BARSHAI, D. WEITZNER, D. VOLOSHIN, F. KRATZERT, G. ELIDAN, G. DROR, G. BEGELMAN, G. NEARING, G. SHALEV, H. NOGA, I. SHAVITT, L. YUKLEA, M. ROYZ, N. GILADI, N. PELED LEVI & Y. MATIAS (2022): Flood forecasting with machine learning models in an operational framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (15), 4013–4032.
- NEWMAN, A.J., M.P. CLARK, K. SAMPSON, A. WOOD, A., L.E. HAY, A. BOCK, R.J. VIGER, D. BLODGETT, L. BREKKE, J.R. ARNOLD, T. HOPSON & Q. DUAN (2015): Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological dataset for the contiguous USA: dataset characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 209-223. DOI:10.5194/hess-19-209-2015.
- RAISSI, M., P. PERDIKARIS & G.E. KARNIADAKIS (2019): Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.
- REICHSTEIN, M., G. CAMPS-VALLS, B. STEVENS, M. JUNG, J. DENZLER, N. CARVALHAIS & PRABHAT (2019): Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science, *Nature*, 566, 195-204, 10.1038/s41586-019-0912-1.
- ROSENBLATT, F. (1958): The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain, *Psychological Review*, vol. 65, pp. 386–408.
- RUMELHART, D.E., G.E. HINTON & R.J. WILLIAMS (1986): Learning internal representations by error propagation. In: Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. (Eds.), *Parallel Distributed Processing*. MIT Press, Cambridge.
- SAHOO, B., R. JHA, A. SINGH et al. (2019): Long short-term memory (LSTM) recurrent neural network for low-flow hydrological time series forecasting. *Acta Geophys.*, 67, 1471–1481.
- STAHL, K., M. WEILER, D. FREUDIGER, I. KOHN, J. SEIBERT, M. VIS, K. GERLINGER & M. BÖHM (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), CHR 00-2016 2016.
- THIREL, G., K. GERLINGER, C. PERRIN, G. DROGUE, B. RENARD & J.-P. WAGNER (2019): Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill)? *La Houille Blanche* 5-6: 140–149. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019039>.
- WANG, Q., Y. MA, K. ZHAO & Y. TIAN (2022): A comprehensive survey of loss functions in machine learning. *Annals of Data Science*, 9 (2), 187–212.
- XU, T. & F. LIANG (2021): Machine learning for hydrologic sciences: An introductory overview. *WIREs Water* 8, (5) (e1533).

Nicolas Dalla Valle & Simon Paul Seibert

Praxistransfer: Abflussscheitel-Füllen-Copulas für die Bemessung von Rückhaltebauwerken

From theory to practice: How to use peak discharge and volume copulas for sizing flood control reservoirs

Die Bemessung von Rückhaltebauwerken erfordert Bemessungsganglinien definierter Jährlichkeit, welche meist auf Basis maximaler Abflussscheitelwerte ermittelt werden. Für Rückhaltebauwerke ist aber vor allem auch das Volumen der Ganglinien relevant. Copulas bieten eine vergleichsweise einfache und flexible Möglichkeit, Hochwasserscheitel und -füllen gemeinsam statistisch zu betrachten und die Auswahl geeigneter Bemessungsereignisse zu objektivieren, sie werden aber in der wasserwirtschaftlichen Praxis in Deutschland bisher kaum genutzt. Als Beitrag zum Praxistransfer zeigt dieser Artikel ein mögliches Vorgehen auf, wie Copulas bei der Speicherbemessung angewendet werden können. An einem Beispieldatensatz wird die Ableitung geeigneter Randverteilungen für Scheitel und Volumina und die Auswahl von Copulamodellen diskutiert. Die angepasste Copula wird dann verwendet, um beobachtete und modellierte Ereignisse hinsichtlich der Jährlichkeit ihrer Scheitel-Volumen-Kombination einzuordnen. Da bisher kaum kommerzielle Software für die Umsetzung der vorgestellten Untersuchungen zur Verfügung steht, werden als Anhang für die einzelnen Arbeitsschritte Codebeispiele in der freien Programmiersprache R bereitgestellt.

Schlagwörter: Bemessung, Rückhaltebecken, Talsperren, Extremwertstatistik, Copulas Abflussscheitel, Ereignisabflussvolumina, Hochwasserfüllen, NA-Modellierung

Dimensioning of flood protection measures requires design hydrographs of defined return period. These are usually defined by maximum peak flow, although flood volume may be more significant. Copulas are a relatively simple and flexible tool for combined statistical analyses of peak flows and flood volumes. They can be used to rationalise the choice of design floods. However, despite their widespread use in science, copulas are still rarely used for practical applications in Germany. In order to foster the use of copulas this paper provides a hands-on example for dam dimensioning. Using gauge data we discuss the estimation of marginal distributions for peak flow and flood volume and the choice of a suitable copula model. Using the fitted copula we estimate the combined return period of peak flow and flood volume of historical events. Moreover, we use the copula to judge the results from a rainfall-runoff model. In order to be able to reproduce the evaluations and transfer them to other use cases, executable R-scripts are available as an appendix.

Keywords: Dimensioning, dam structures, extreme value statistic, copula, peak flow, flood volume, rainfall runoff modeling

1 Einleitung

Für die Bemessung von Speichern und Talsperren nach DIN 19700 (DIN 2004a, 2004b) sind Scheitel und Volumina und damit Ganglinien und deren Form von Bemessungshochwassern definierter Auftretenswahrscheinlichkeit erforderlich. Neben den Abflussscheiteln sind dabei Informationen zu den Abflussfüllen und zu Kombinationen möglicher Scheitel und Füllen relevant. Trotz der Bedeutung der Füllen spielen diese in der Bemessungspraxis bis heute oft nur eine nachgeordnete Rolle: Bestehende Empfehlungen (DWA-M 552, 2012) beschränken sich weitgehend auf die Auswertung und statistische Einordnung der Abflussscheitel.

In der Praxis werden die benötigten Ganglinien meist durch Niederschlag-Abfluss-Modellierung (NA-Modellierung) erzeugt, da Messdaten extremer Ereignisse in der Regel fehlen. Allerdings bestehen in der Kalibrierung (und Evaluation) hydrologischer NA-Modelle ähnliche Defizite wie in der Extremwertstatistik: Hier kommen üblicherweise verschiedene Gütekriterien, visuelle Vergleiche simulierter und gemessener Ganglinien (GUPTA et al., 2009; CROCHEMORE et al., 2009) oder Gegenüberstellungen mit Hochwasserabflussquantilen zum Einsatz, eine dezidierte Auswertung und statistische Einordnung simulierter Ereignisabflussvolumina (im Folgenden: "Hochwasserfüllen") wird i. d. R. aber nicht durchgeführt.

Zur statistischen Einordnung simulierter und auch beobachteter Hochwasserfüllen sind zunächst Auswertungen von Hochwasserfüllen und (multivariate) Analysen über mögliche Kombinationen von Scheiteln und Füllen relevant. Die Ermittlung von Auftretenswahrscheinlichkeiten von Hochwasserfüllen erfordert Verfahren zur Abtrennung von relevanten Niederschlag-Abfluss-Ereignissen aus kontinuierlichen Zeitreihen sowie belastbare Vorgehensweisen zur Ermittlung ihrer theoretischen Extremwertverteilung analog dem Vorgehen bei Abflussscheiteln. Für die Bemessung von Speichern sind zudem Extrapolationsverfahren erforderlich, um Ereignisse mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit wie 1.000- oder 10.000-jährliche Ereignisse zu bestimmen. Für die Ermittlung von Scheitelwerten geringer Jährlichkeit haben sich dazu in der Praxis pragmatische Vorgehensweisen wie die Skalierung des HQ_{100} mit einem empirischen Faktor oder die Konvention von KLEEBERG & SCHUMANN (2001) etabliert und werden mangels Alternativen weiter genutzt, obwohl z. B. letztere nicht mehr zur Anwendung empfohlen wird (SCHUMANN & FISCHER, 2023). Auch zur Ableitung extremer Niederschläge existieren entsprechende Verfahren z. B. PEN-LAWA (VERWORN & KUMMER, 2003), FISCHER & SCHUMANN (2018) oder KOUTSOYIANNIS et al. (1998). Für die Extrapolation von Hochwasserfüllen fehlt bisher allerdings ein etabliertes Vorgehen.

Multivariate Fragestellungen und Herausforderungen bestehen in der wasserwirtschaftlichen Praxis nicht nur bei der Speicher-

bemessung. Auch für die Ermittlung von Lastfallkombinationen beim Aufeinandertreffen von Gewässern z. B. zur Dimensionierung von Schöpfwerken, zur Ermittlung von Planungsgrößen für Hochwasserschutzmaßnahmen oder der statistischen Einordnung von Abflussscheiteln, die sich aus der Überlagerung verschiedener Zuflüsse ergeben, ist die kombinierte Betrachtung verschiedener Einflussgrößen erforderlich. Hier behilft sich die Praxis bisher überwiegend mit sehr pragmatischen Ansätzen wie der Mündungsformel (RP STUTTGART, 2012) oder dem "Quantil-Differenzen-Ansatz" (BENDER, 2015). Diese Vorgehensweisen sind einfach anwendbar, lassen aber das hydrologische Regime der Zuflüsse außer Acht.

Diesen vereinfachten Vorgehensweisen wird in der wissenschaftlichen Fachliteratur das Potenzial von Copulaansätzen ("Copula" lat. binden, verbunden) (SKLAR, 1959, 1997) entgegengehalten, die eine gemeinsame statistische Modellierung von Zufallsvariablen erlauben. Copulas ermöglichen die flexible Konstruktion multivariater Verteilungsfunktionen, da ihre univariaten Randverteilungen unabhängig voneinander und vom gewählten Copulamodell ermittelt werden können, während die Copulafunktion die Abhängigkeitsstrukturen der betrachteten Größen abbildet. Dadurch können mit Copulas auch komplexe, höher dimensionale Abhängigkeitsstrukturen statistisch abgebildet und modelliert werden. In der wissenschaftlichen hydrologischen Fachliteratur finden sich zahlreiche Anwendungsfälle (TOOTONCHI et al., 2022; SALVADORI et al., 2016) und es bestehen auch schon weiterführende Untersuchungen, z. B. zur Berücksichtigung der angesichts von Landschafts- und Klimawandel gerade für die Bemessung von Rückhaltebauwerken sehr relevanten und in vielen Zeitreihen beobachteten Instationarität (LI et al., 2023; BENDER et al., 2014).

Trotz ihres großen Potenzials sind multivariate Untersuchungen in der hydrologischen Praxis in Deutschland allerdings bisher kaum verbreitet. Anknüpfend an Arbeiten von BENDER (2015) und BENDER et al. (2018) besteht daher das Ziel dieses Artikels darin, Copulaansätze für die Bemessung von Speichern und Rückhaltebauwerken für die Praxis zugänglicher zu machen. Dazu werden anhand eines Beispieldatensatzes in einem ersten Schritt Randverteilungen für Scheitel und Füllen ermittelt und dann verschiedene Copulamodelle getestet. Die angepassten Copulamodelle werden genutzt, um beobachtete und mit NA-Modellen simulierte Hochwasserereignisse bzgl. ihrer Kombination von Abflussscheitel und -volumen statistisch einzuordnen.

Um die fachliche Diskussion der vorgestellten Methode in der Fachgemeinschaft zu stimulieren, ihre Verbreitung in der Bemessungspraxis und die Entwicklung von Standards zu fördern und um dem Mangel an kommerzieller Software entgegenzuwirken, wird im Anhang ein Praxisbeispiel mit lauffähigen, ausführbaren Skripten in der frei verfügbaren Programmiersprache R (R CORE TEAM, 2021) bereitgestellt. Die Skripte können auf Anfrage auch über die Autoren bezogen werden.

Methodisch gegliedert ist der Artikel in eine Beschreibung des Datensatzes (Kap. 2.1), die Ermittlung der Randverteilungen von Abflussscheiteln (Kap. 2.3) und Hochwasserfüllen (Kap. 2.4), die Parametrisierung und Evaluation unterschiedlicher Copulas (Kap. 2.5) sowie in eine knappe Erläuterung der Grundlagen zur Anwendung ereignisbasierter NA-Modelle (Kap. 2.6). Ergebnisse

und Diskussion finden sich in Kapitel 3, der Artikel schließt mit einem Ausblick.

2 Material und Methoden

2.1 Daten

Als Beispieldatensatz für diesen Beitrag verwenden wir Aufzeichnungen des Gesamtzufusses zu einem Speicher mit großem alpinem Einzugsgebiet (Fläche ca. 1.140 km²). Das Gebiet war in den letzten 25 Jahren vermehrt von größeren Hochwassern betroffen (insb. Mai 1999 und August 2005). Für den Speicherzufluss liegen kontinuierliche Abflussbeobachtungen ab dem Abflussjahr (AJ) 1950 vor, ab dem Jahr 1959 stündliche Momentanwerte, vorher Tageshöchstwerte und unregelmäßige Einzelmessungen bei Hochwasser.

Für eine gemeinsame Auswertung der Scheitel und Füllen müssen die mit den Scheitelwerten korrespondierenden Füllen ermittelt werden, also Ereignisabflussvolumina bzw. Hochwasserfüllen. Zur Ableitung wurde automatisiert ausgehend vom Jahreshöchstwert der Teil der Ganglinie horizontal abgetrennt, der über einem Grenzwert von 50 m³/s liegt. Dieses Vorgehen wird ausführlich in Kapitel 3.1 diskutiert. Um Artefakte in der Abtrennung zu vermeiden, wurden alle resultierenden Ganglinien visuell überprüft. Die resultierenden Jahresserien von Scheitel und Füllen sind grafisch (Abb. 1) und in den Codebeispielen im Anhang hinterlegt.

Das MHQ der Serie liegt bei rund 330 m³/s, die korrespondierende mittlere Hochwasserfülle (MHV) bei 22,1 Mio. m³. Die grafische Gegenüberstellung zeigt eine hohe Varianz der einzelnen Stichproben (der Variationskoeffizient der Scheitelwerte beträgt 0,55, der der Füllen 1,04). Dies spiegelt sich auch in einem mittleren Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,76$ und einer Rangkorrelation nach Kendall (τ) von 0,72 wider.

Da beide Reihen lediglich zur Illustration des Vorgehens dienen, wird an dieser Stelle auf eine Diskussion der Datenqualität, Repräsentativität und Homogenität verzichtet und angenommen, dass alle erforderlichen statistischen Kriterien erfüllt werden. Die für eine extremwertstatistische Auswertung erforderlichen Kriterien und Methoden für ihre Prüfung werden z. B. in DWA-M 552 (2012) und DWA-M 552 (2024, im Gelbdruck) erläutert.

2.2 Software

Alle statistischen Berechnungen wurden mit der Statistiksoftware R (Version 4.1.1) durchgeführt. Für die Extremwertstatistik wurde das Paket *Imomco* (Version 2.3.7) (ASQUITH, 2021) und für die Erstellung der Copulas das Paket *copula* (Version 1.0-1) (HOFERT et al., 2020) verwendet. Für die Erstellung von Abb. 3 wurde auch das Paket *copBasic* (Version 2.2.3) (ASQUITH, 2024) genutzt. Einige ergänzende Untersuchungen wurden mit dem Paket *VineCopula* (Version 2.5.0) vorgenommen (NAGLER et al., 2023). Um die Anwendung der Methoden zu vereinfachen, werden im Anhang für die einzelnen Bearbeitungsschritte lauffähige Codebeispiele dargelegt, die in R ausgeführt werden können.

2.3 Extremwertstatistik für die Hochwasserscheitel

Zur Ermittlung von Hochwasserquantilen werden üblicherweise auf Grundlage einer Stichprobe (Jahresserie) die Parameter einer Extremwertverteilung geschätzt. Da dieses Vorgehen in der Praxis allerdings nicht immer umsetzbar ist, wird nachfolgend eine

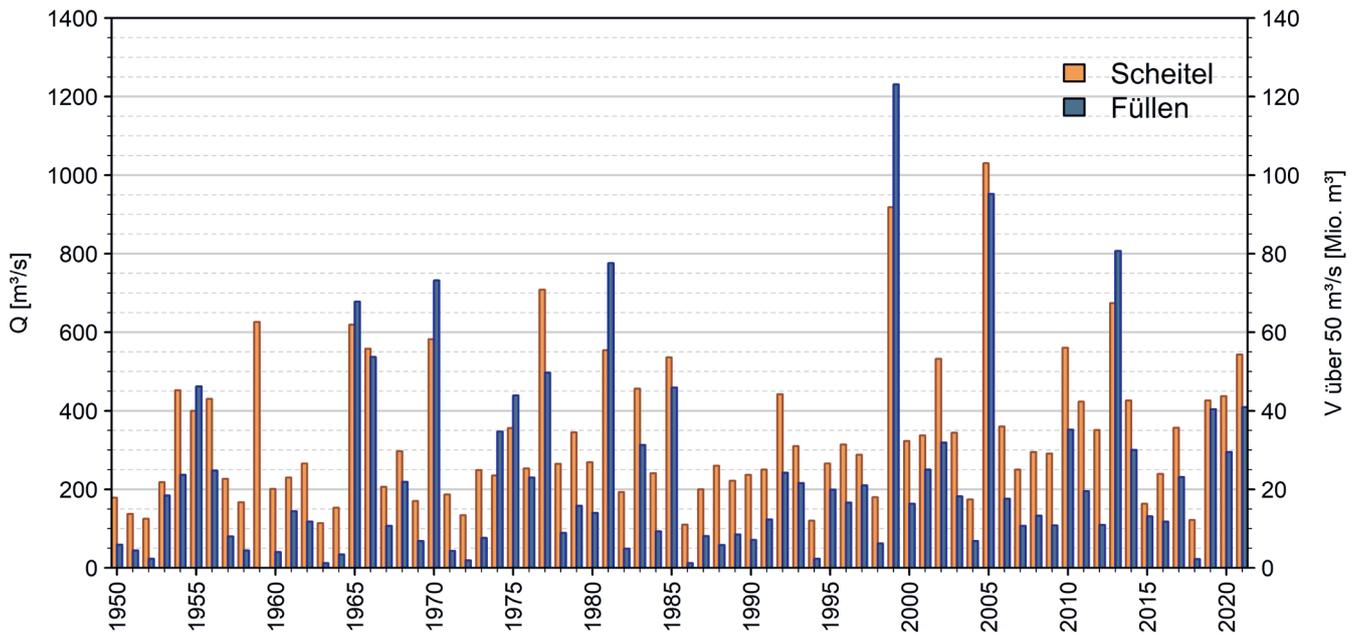


Abbildung 1

Beispieldatensatz: Serie der Jahreshöchstwerte des Abflusses und korrespondierender Ereignisfüllen (Hochwasserfüllen) über einem Abfluss von 50 m³/s (Abflussjahre 1950 – 2021).

Example data set: Series of annual peak flow maxima and corresponding flood event volumes above 50 m³/s (hydrological years 1950 – 2021).

Alternative dargelegt: Sie geht davon aus, dass zur Ermittlung einer Randverteilung für die Hochwasserscheitel eine Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) durch Parameteroptimierung an bereits vorliegende Hochwasserquantile für die Wiederkehrzeiten 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a, 1.000 a und 10.000 a angepasst werden kann. Dadurch kann eine zu Bestandswerten passende, kontinuierliche Randverteilung erzeugt werden, die auch den Extrembereich bis HQ_{10.000} abdeckt. Zudem erlaubt dieses Vorgehen den in der Praxis üblicherweise vorliegenden methodischen Bruch zwischen der Ermittlung von Quantilen ≤HQ₁₀₀ und >HQ₁₀₀ zu überwinden. Vor- und Nachteile dieses Vorgehens werden in Kapitel 3.2 erläutert und diskutiert. Das Ergebnis der Anpassung zeigt Abbildung 2 (links). Ein Codebeispiel für das Vorgehen kann Anhang 1 entnommen werden.

2.4 Extremwertstatistik für die Hochwasserfüllen

Für die extremwertstatistische Auswertung der Hochwasserfüllen wurde zunächst eine Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) an die korrespondierenden Füllen angepasst. Dieses Vorgehen führte bei Verwendung des Beispieldatensatzes aber zu nicht plausiblen Füllen für Ereignisse mit sehr geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit. Daher wurde für die Ermittlung einer Randverteilung der Füllen der im Rahmen des MUNSTAR-Projekts (JUNGHÄNEL et al., 2022) für die Extremwertstatistik von Niederschlägen herausgearbeitete Ansatz auf Basis von KOUTSOYIANNIS (2004a, b) und KOUTSOYIANNIS et al. (1998) übernommen. Dieses Vorgehen unterstellt eine Heavy-tailed-Verteilung, wie sie für Niederschlagsmengen meist vorliegt, und ist daher vermutlich besser geeignet als der frühere KOSTRA-Ansatz (MALITZ & ERTEL, 2015). Zur Umsetzung wird die Verallgemeinerte Extremwertstatistik (GEV) mit einem vorgegebenen Formparameter von 0,1 auf Basis von L-Momenten an die Jahresserie der Füllen angepasst (zur Verdeutlichung der Unterschiede

wird in Abb. 2, rechts zusätzlich eine "reguläre" GEV ohne vorgegebenen Formparameter an die Daten angepasst). Die ermittelte Verteilungsfunktion wird auch für die Abschätzung von 1.000- und 10.000-jährlichen Füllen (HV_{1.000}, HV_{10.000}) verwendet (Abb. 2). Analog zu den Abflussscheiteln wird so eine kontinuierliche Verteilungsfunktion für den gesamten Wertebereich ermittelt, die als Randverteilung für die Copula verwendet werden kann. Das Vorgehen wird in Kapitel 3.3 diskutiert. Ein Codebeispiel für die Anpassung findet sich in Anhang 2.

2.5 Copulas

In der Literatur ist eine große Zahl an Copulamodellen beschrieben (GENEST & FAVRE, 2007), die sich in ihrer Form und Abhängigkeitsstruktur mitunter stark unterscheiden. Ebenso wie bei den univariaten Verteilungsfunktionen für die Extremwertstatistik gibt es kein theoretisch "bestes" Copulamodell. In hydrologischen Untersuchungen werden häufig einparametrische, archimedische Copulas verwendet wie beispielsweise die Clayton-, Frank- oder Gumbel-Copula (TOOTOONCHI et al., 2022; GENEST & FAVRE, 2007 und CHOWDARY et al., 2011; DE MICHELE et al., 2005; POULIN et al., 2007; SRAJ et al., 2014). Diese unterscheiden sich in der Abhängigkeitsstruktur an den Rändern der multivariaten Verteilungen (Abb. 3). Die Gumbel-Copula unterstellt eine enge Abhängigkeit am oberen Rand, d. h. bei den hohen Wertebereichen der (beiden) Variablen. Hydrologisch ist dies gegeben, wenn sehr hohe Abflussscheitel meist auch sehr hohe Volumina aufweisen. Umgekehrt steht die Clayton-Copula für enge Abhängigkeiten an den unteren Rändern der beiden Verteilungen. Für den Extrembereich bedeutet dies, dass hier sowohl Hochwasserereignisse mit mittlerem Scheitel und sehr hohen Volumina als auch umgekehrt, Ereignisse mit sehr großem Scheitel und mittleren Volumina auftreten können. Die Frank-Copula ist geeignet, wenn keine gewichtete Abhängigkeit besteht. Da der Fokus bei

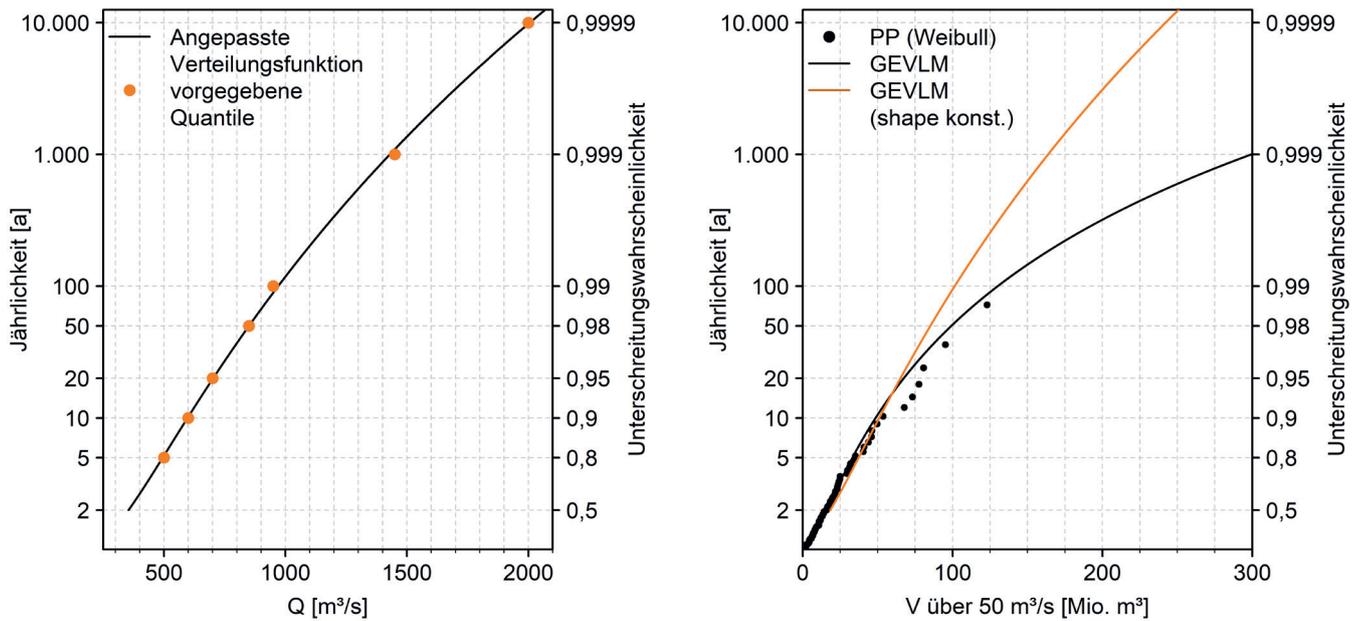


Abbildung 2

Links: Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) an bestehende Hochwasserquantile für den betrachteten Pegel (Codebeispiel in Anhang 1). Rechts: An die Jahresserie der Hochwasserfüllen angepasste Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) mit fixiertem Formparameter von 0,1 (orange, Codebeispiel in Anhang 2) und mit freier Parameteranpassung (schwarz). Dargestellt sind außerdem die Plotting Positions (PP) der Beobachtungsdaten nach Weibull.

Left: Generalised extreme value distribution (GEV) fitted to given flood quantiles for the examined gauge (code example in appendix 1). Right: Generalised extreme value distribution (GEV) fitted to the annual series of flood volumes with fixed shape parameter of 0.1 (orange, code example in appendix 2) and with free parameter estimation (black). The black dots are the Weibull plotting positions.

der Bemessung auf dem oberen Rand liegt, sollte die gewählte Copulafunktion insbesondere in diesem Bereich eine gute Übereinstimmung zeigen.

Neben den angepassten Copulas können auch multivariate empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Datenpaare (H_i) angegeben werden. Anders als im univariaten Fall sind dafür aber unterschiedliche Definitionen denkbar, da in einem Datenpaar Werte mit abweichenden univariaten empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten kombiniert sein können (SALVADORI et al., 2016). In der Copulaliteratur (GENEST & FAVRE, 2007) wird die Berechnung nach FISHER & SWITZER (1985, 2001) empfohlen. Danach ist H für jedes Datenpaar der Quotient aus der Anzahl der Datenpaare, bei denen beide Werte kleiner oder gleich den Werten des betrachteten Datenpaares sind und der Anzahl $n-1$ der Beobachtungen.

Statistisch lässt sich die Abhängigkeit zweier Größen u. a. durch die Rangkorrelation nach Kendall (τ) ausdrücken. Der Copulaparameter (θ) von z. B. Clayton-, Frank- oder Gumbel-Copula kann direkt und robust aus τ abgeleitet werden, weshalb dieses Vorgehen häufig anderen Möglichkeiten zur Parameterschätzung wie z. B. dem maximum pseudo likelihood-Schätzer (MPL) vorgezogen wurde (GENEST & FAVRE, 2007; BENDER et al., 2013) und auch in dieser Untersuchung verwendet wird.

Da das gewählte Copulamodell eine Annahme über die Abhängigkeitsstruktur der betrachteten Größen vorgibt, kann die Wahl der Copula ähnlich sensitiv wie die Wahl einer Verteilungsfunktion in der univariaten Extremwertstatistik sein und sollte gewis-

senhaft erfolgen und fachlich begründet werden (POULIN et al., 2007). Letzteres ist in bestehenden Studien leider nicht immer der Fall (TOOTOONCHI et al., 2022; MICHIELS & DE SCHEPPER, 2008). Da sich bis heute keine Empfehlungen auf Basis systematischer Vergleiche verschiedener Copulafamilien für wasserwirtschaftliche Fragestellungen etabliert und Tests anderer Copulafamilien mit dem R-Paket *VineCopula* keinen signifikanten Mehrwert ergeben haben (NAGLER et al., 2023), werden auch in dieser Untersuchung beispielhaft die Frank-, Clayton- und Gumpel-Copula betrachtet.

Zur Beurteilung der Anpassungsgüte der Copula an die Beobachtungsdaten werden zunächst die statistischen Parameter S_n und R_n nach GENEST et al. (2009, 2013) berechnet. Beide Werte basieren auf der Abweichung zwischen den H_i der Beobachtungen und den an die Beobachtungen angepassten Copulamodellen. Ihre Werte sollten daher möglichst klein sein. Beide Verfahren erlauben außerdem die Prüfung der Nullhypothese, dass die H_i einem der angepassten Copulamodelle entstammen. Ein geeignetes Copulamodell sollte deshalb einen p-Wert aufweisen, der nicht zur Ablehnung der Nullhypothese führt (z. B. mehr als 0,05) (GENEST et al., 2013). Die Ermittlung von S_n und R_n sowie die Parametrisierung einer Copula können mit dem Beispielcode in Anhang 3 nachvollzogen werden.

Zudem wurden Kendall-Plots (K-Plots) (GENEST & BOIES, 2003; GENEST & FAVRE, 2007) erstellt. Diese sind von Quantil-Quantil-Plots inspiriert und können als multivariate Erweiterung der Plotting-Position-Plots verstanden werden. Hier werden die H_i der Beobachtungen und die Erwartungswerte der H_i auf Basis

der angepassten Copula gegen die theoretische Unterschreitungswahrscheinlichkeit aufgetragen, die vorliegen würde, wenn die untersuchten Größen unabhängig voneinander wären ($W_{i,n}$). Dabei steht i für den Rang der einzelnen Datenpaare und n für die Anzahl der Beobachtungen bzw. der verfügbaren Datenpaare. Zur Ermittlung der Erwartungswerte der H_i für die angepassten Copulas können wiederholt Serien von zufälligen Datenpaaren (im dargelegten Beispiel 1.000 Wiederholungen) aus der Copula gezogen und für diese die H_i berechnet werden. Damit das Ergebnis mit den Beobachtungen vergleichbar bleibt, muss die Zahl der Datenpaare pro Serie der Anzahl der Beobachtungspaare entsprechen. Der Erwartungswert der einzelnen H_i ergibt sich dann als Mittelwert aus den Wiederholungen. Liegt der Verlauf der H_i der Beobachtungen (überwiegend) nahe am Verlauf der Werte aus einer angepassten Copula, bildet letztere die Abhängigkeitsstruktur der Randverteilungen gut ab. In Analogie zur üblichen Darstellung bei der Anpassung von Verteilungsfunktionen in der univariaten Statistik (Abb. 2) ist auch bei dieser Darstellung eine Logarithmierung und Angabe von Jahrzehnten möglich (Abb. 4, rechts), um besonders den Extrembereich betrachten zu können. Ein Beispielcode für die Erstellung eines K-Plots ist in Anhang 4 gegeben.

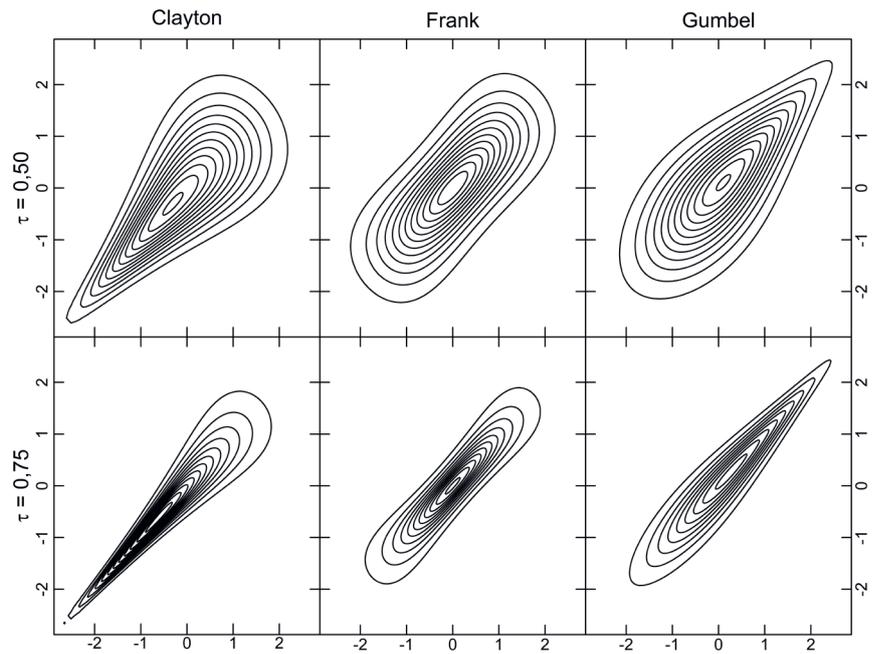


Abbildung 3
Schematische Darstellung der Abhängigkeitsstruktur verschiedener Copulamodelle in Abhängigkeit von der Rangkorrelation nach Kendall (τ) der beiden untersuchten Größen. Für die Darstellung wird für beide Randverteilungen eine Standardnormalverteilung angenommen, deren Wertebereiche auf den Achsen dargestellt sind.
Schematic representation of the dependence structure of different copula models based on Kendall's rank correlation coefficient (τ) of the two analysed variables. A standard normal distribution was assumed for both marginal distributions.

Zuletzt werden Streudiagramme z. B. analog CHOWDHARY et al. (2011) generiert, indem aus den angepassten Copulas durch zufälliges "Ziehen" 100.000 synthetische Datenpaare erzeugt wurden. Diese Kombinationen von Unterschreitungswahrscheinlichkeiten aus Scheitel und Füllen, die auf Basis der jeweiligen Copula gemeinsam auftreten können, lassen sich anhand der in Kapitel 2.3 und 2.4 ermittelten Randverteilungen in den tatsächlichen Wertebereich übertragen. Zusätzlich lassen sich in dem Diagramm Beobachtungsdaten darstellen. Der Vorteil dieser Visualisierung ist, dass die Güte des Gesamtmodells, bestehend aus Randverteilungen und Copula, beurteilt werden kann. Zudem lassen sich im Streudiagramm Isolinien gleicher Unterschreitungswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten darstellen. Ein Codebeispiel für die Erstellung des Streudiagramms ist in Anhang 5 hinterlegt.

Als letztes Kriterium werden die größten Ereignisse der verfügbaren Stichprobe analysiert (z. B. hinsichtlich Genese, Einfluss von Schneeschmelze, Bedeutung mehrgipfliger Ganglinien, usw.) und das hydrologische Regime des Einzugsgebiets berücksichtigt, um die Auswahl der Copula auch mit physikalischen Argumenten zu stützen.

2.6 Ableitung von Bemessungsganglinien mit Niederschlag-Abfluss-Modellen

Die Bemessung von Speichern erfordert Ganglinien, die beim Fehlen geeigneter Messdaten extremer Ereignisse üblicherweise mit NA-Modellen generiert werden. Für die Ermittlung wird i. d. R. einem inzwischen 40 Jahre alten "Bemessungskonzept"

(DVWK Regeln 112, 1982; DVWK Regeln 113, 1984)) gefolgt und ein Ensemble aus Ganglinien generiert. Aus diesem müssen dann plausible Vertreter ausgewählt werden, was häufig schwierig und subjektiv ist. Als Anwendungsbeispiel wird daher zusätzlich gezeigt, wie Copula-Auswertungen verwendet werden können, um Ergebnisse von NA-Modellen hinsichtlich der kombinierten statistischen Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Scheitel und Füllen einzelner Ganglinien einzuordnen. Dadurch können begründet aus dem Ensemble für die Bemessung geeignete Ganglinien ausgewählt werden. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden kurz das "Bemessungskonzept" erläutert.

Zur Ermittlung eines Ganglinienensembles wird ein NA-Modell mit (ggf. abgeminderten) Bemessungsniederschlägen z. B. KOSTRA (MALITZ & ERTEL, 2015; JUNGHÄNEL et al., 2017; JUNGHÄNEL et al., 2022) oder PEN-LAWA (VERWORN & KUMMER, 2003) unterschiedlicher Dauerstufen und mit einer synthetischen zeitlichen Niederschlagsverteilung durchgerechnet. In der Regel wird dabei angenommen, dass das gesamte Einzugsgebiet gleichzeitig, einheitlich und vollflächig überregnet wird. Aus den Berechnungen ergibt sich dann für jeden Fließquerschnitt ein maximaler Abfluss pro Dauerstufe. Gegebenenfalls wird die Kalibrierung des Modells noch so modifiziert, dass der größte dieser maximalen Abflüsse einem Referenzwert z. B. einem statistisch abgeleiteten Hochwasserquantil entspricht. Die zugehörige Dauerstufe ist die maßgebliche Dauerstufe (für den Scheitel) des Fließquerschnitts. Bei diesem Vorgehen wird von einer Gleichsetzung der Jährlichkeiten von Niederschlagssumme und Abflussscheitel ausgegangen, d. h. im nachkalibrierten Modell erzeugt

ein hundertjähriger Bemessungsniederschlag an einem Pegel in der maßgeblichen Dauerstufe einen hundertjährigen Abflussscheitel. Die Gültigkeit dieser Annahme wird dann meist auch für alle anderen Fließquerschnitte im Modell unterstellt. Die korrekte Abbildung der Abflussfülle wird bei diesem Vorgehen nicht berücksichtigt.

Maßgeblich für die Bemessung von Speichern und Talsperren sind i. d. R. die Zuflussganglinien, die im Speicher das größte Rückhaltevolumen erfordern. Häufig handelt es sich dabei nicht um die Ganglinien mit dem größten Zuflussscheitel, sondern um Ganglinien mit einem kleineren Scheitel, aber größerer Dauer und damit höherer Fülle. Während die maßgebliche Dauerstufe für den Scheitel allein von den Eigenschaften des Einzugsgebiets bestimmt wird, hängt die maßgebliche Dauerstufe für die Speicherbemessung zusätzlich von den Eigenschaften und der Steuerung des Bemessungsbauwerks ab.

Für das gewählte Beispiel wurden Zuflussganglinien analog des oben skizzierten Vorgehens mit dem NA-Modell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell, LUDWIG & BREMICKER, 2006) erzeugt. Das Modell wurde entsprechend bestehender Standards durch Änderung der programminternen Abflussbildungskomponente (BAF-Wert der Abflussbeiwertfunktion) so nachkalibriert, dass bei Niederschlägen einer bestimmten Jährlichkeit an allen relevanten Pegel in der dort maßgeblichen Dauerstufe Abflussscheitel der gleichen Jährlichkeit erreicht werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ereignisabgrenzung und Ermittlung der Hochwasserfüllen

In unserem Beispiel verwenden wir mit Jahreshöchstwerten des Abflusses korrespondierende Füllen (Hochwasserfüllen). Ein wesentliches Hemmnis für die Anwendung von Extremwertstatistik für Hochwasserfüllen (und analog für die Anwendung von Scheitel-Füllen-Copulas) besteht bisher in dem Fehlen von Konventionen, Werkzeugen und Erfahrungen in der Ermittlung der Hochwasserfüllen. Anders als für die Scheitelwerte liegen standardmäßig keine Jahresserien korrespondierender Füllen vor. Für die Berechnung der Füllen werden Ganglinien benötigt. In der Praxis führt dies oft zu Einschränkungen, da hochaufgelöste Ganglinien – im Gegensatz zu Scheitelwerten – häufig erst seit wenigen Jahrzehnten vorliegen. Für historische Zeiträume sind häufig gar keine Ganglinien verfügbar oder diese liegen nur in sehr grober zeitlicher Auflösung vor, z. B. als "Tagesmittelwerte", die auf Basis weniger Einzelmessungen abgeleitet wurden.

Für die Abgrenzung von Ereignissen in kontinuierlichen Zeitreihen existiert bis heute kein operationell einsetzbares Verfahren, das unter verschiedensten Bedingungen automatisiert belastbare Ergebnisse liefert (SEIBERT et al., 2016; DWA-M 552, 2024, im Gelbdruck). Für Einzelfallbetrachtungen wie die hier skizzierte Speicherbemessung ist es vertretbar, die Ganglinie vereinfachend bei einem Grenzwert horizontal abzutrennen – insofern das Ergebnis plausibilisiert und ggf. korrigiert wird. Der Grenzwert von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde hier gewählt, weil diese Menge am betrachteten Speicher in allen relevanten Szenarien dauerhaft abgegeben werden kann. Das Volumen unter dem Grenzwert ist daher für die Bemessung der Rückhalteräume im Speicher

nicht relevant. Ein derartiger Grenzwert für die Abtrennung der Ganglinie sollte bei der Bemessung von Rückhaltebauwerken immer vorliegen, z. B. der gewünschte Drosselabfluss, sodass sich das Vorgehen auch auf andere Bauwerke übertragen lässt. Der Grenzwert muss so niedrig gewählt werden, dass nicht zu viele Ereignisse aus der Auswertung ausgeschlossen werden, weil ihre Scheitelwerte unter dem Grenzwert liegen. Das kann insbesondere bei der Verwendung von Jahresserien ein Problem sein, da diese häufig auch kleine Scheitelwerte aus hochwasserarmen Jahren beinhalten. Eine Lösung könnte die Verwendung partieller Serien darstellen, da der Grenzwert für die Abgrenzung der Serien dann auch für die Füllenberechnung verwendet werden kann. Weitere Einschränkungen können sich bei der Führung von Sicherheitsnachweisen nach DIN 19700 (DIN 2004a, 2004b) ergeben: Hier muss dann gewährleistet sein, dass der Grenzwert auch die Kriterien der unterschiedlichen Entlastungsszenarien (n-Fall vs. (n-1)-Fall) einhält, die für die verschiedenen Bemessungshochwasser vorgesehen sind.

Die Abgrenzung von Ereignissen über einen konstanten Grenzwert ist für den dargestellten Anwendungsfall hinreichend, im Allgemeinen aber stark vereinfachend. An Pegeln oder in Einzugsgebieten mit ausgeprägtem Jahresgang in der Abflussdynamik oder wenn Hochwasserereignisse unterschiedlicher Genese auftreten sind andere Ereignisabgrenzungsverfahren vorzuziehen (BLUME et al., 2007; TARASOVA et al., 2018). Hier sind weitere Bemühungen wünschenswert, um einen Praxistransfer der vorliegenden Forschungsansätze zu erreichen und Erfahrungen und operationell einsetzbare Werkzeuge verfügbar zu machen.

3.2 Extremwertstatistik für die Hochwasserscheitel

Durch die Anpassung der Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) an bestehende Hochwasserquantile wurde für den Beispieldatensatz eine kontinuierliche Randverteilung für die Copula-Auswertung ermittelt. Aus statistischer Perspektive ist dieses Vorgehen nicht korrekt. Stattdessen sollte die Randverteilung durch Anpassung an die Jahreshöchstwerte ermittelt werden. Hier wurde als Beispiel aber bewusst ein abweichendes, alternatives Vorgehen gewählt, das Copula-Auswertungen ermöglicht, die konkordant zu bestehenden Bemessungswerten sind. Es ist damit auch auf den in der Praxis sehr relevanten Fall anwendbar, dass eine Füllenstatistik und Copula-Auswertung zu bestehenden Scheitelquantilen ergänzt werden sollen. Auch ermöglicht diese Vorgehensweise die Ableitung und Anpassung einer stetigen Randverteilung an Bemessungswerte, die mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden oder gar nicht auf einer extremwertstatistischen Auswertung der Jahresserie beruhen, weil bei der Ermittlung z. B. verschiedene Kriterien der Informationserweiterung berücksichtigt wurden.

Aus langjähriger Erfahrung am Bayerischen Landesamt für Umwelt ist dies in der Anwendungspraxis häufig der Fall und auch konsistent mit bestehenden Praxisempfehlungen (vgl. DWA-M 552 (2012), DWA-M 552 (2024, im Gelbdruck)). Bei der Speicherbemessung gilt dies bspw. für Werte mit sehr geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit wie dem $HQ_{1.000}$ oder $HQ_{10.000}$ nahezu immer. Diese werden aufgrund der sonst erforderlichen Extrapolation i. d. R. per Konvention z. B. nach dem inzwischen veralteten (SCHUMANN & FISCHER, 2023) Ansatz von KLEEBERG & SCHUMANN (2001) oder als Vielfaches des HQ_{100} ermittelt.

Mit dem Vorgehen konnte in dem gewählten Beispiel eine gute Anpassung an alle vorgegebenen bemessungsrelevanten Hochwasserquantile erreicht werden. Andererseits wurde für den Bereich häufiger Ereignisse (kleiner ca. HQ5) keine gute Übereinstimmung erzielt, wie z. B. an der Clayton-Copula ersichtlich wird (Abb. 5), deren mit der Randverteilung umgerechnete Punktwolke aus zufälligen Datenpaaren im Bereich kleiner HQ5 gegen die Messwerte verschoben ist. Da für die hier diskutierte Anwendung der Speicherbemessung vor allem besonders seltene Ereignisse relevant sind, ist die Abweichung bei häufigen Ereignissen hier nicht problematisch und vertretbar. Bei der Ableitung der Randverteilungen sollte grundsätzlich auf eine belastbare Abbildung des relevanten Datenbereichs geachtet werden. Nach Möglichkeit sollten immer auf Grundlage einer Stichprobe die Parameter der Verteilung neu geschätzt und dann die Quantile bestimmt werden.

3.3 Extremwertstatistik für die Hochwasserfüllen

Auch für die extremwertstatistische Auswertung der Hochwasserfüllen fehlt es bisher an geeigneten Handreichungen und Erfahrung. Das DWA-Merkblatt zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten DWA-M 552 (2012) bspw. sparte das Thema explizit aus. In der fortgeschriebenen Fassung wird nun für die statistische Auswertung der Füllen ein analoges Vorgehen zur Scheitelstatistik empfohlen (DWA-M 552, 2024, im Gelbdruck). Damit besteht auch für die Auswertung der Füllen die Problematik, dass zwischen einer Vielzahl mathematischer Modelle gewählt werden muss, ohne dass eine Unterscheidung auf Basis physikalischer Kriterien möglich ist. Eine besondere Problematik besteht darüber hinaus – ebenso wie bei der Scheitelstatistik – in der Extrapolation auf Hochwasserfüllen mit sehr geringen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten. Hier bestehen nach unserer Kenntnis bisher keine systematischen Untersuchungen und es sind ähnliche Unsicherheiten wie bei der Scheitelstatistik zu erwarten.

Für den gewählten Beispieldatensatz ergaben sich bei der freien Anpassung einer Verteilungsfunktion für extreme Hochwasser unplausible Abflussfüllen, z. B. ein 10.000-jährliches Hochwasservolumen von 650 Mio. m³, dies entspricht 125 % des mittleren Jahresabflusses oder einem Effektivniederschlag im Einzugsgebiet von nahezu 600 mm, was deutlich über den 72 h-PEN-Werten für das Einzugsgebiet liegt. Es war deshalb notwendig, eine Einschränkung bei der Extrapolation einzuführen.

Da Hochwasserfüllen niederschlagsgetrieben sind und etablierte Alternativen fehlen, erschien eine Übertragung von Ansätzen zur Ermittlung von Niederschlagsmengen mit geringen Überschreitungswahrscheinlichkeiten sinnvoll. Ein möglicher Weg wäre daher das für die Erstellung des KOSTRA2020-Datensatzes

verwendete Vorgehen basierend auf KOUTSOYIANNIS (2004a, b) und KOUTSOYIANNIS et al. (1998), bei dem eine Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) mit festem Formparameter von 0,1 an die Stichprobe angepasst wird (JUNGHÄNEL et al., 2022). Unter der Annahme, dass extreme Füllen nur bei sehr langen und extremen Niederschlagsereignissen auftreten und bei diesen Ereignissen im Einzugsgebiet ein konstanter (End-)Abflussbeiwert erreicht wird, erscheint die Übertragung des Formparameters für die Abschätzung von Hochwasserfüllen in erster Näherung gerechtfertigt. Die Untersuchungen beziehen sich allerdings nur auf Niederschlagsmengen mit Jährlichkeiten bis 100 a. Da die maximalen Niederschlagsmengen und damit auch die Hochwasserfüllen physikalisch begrenzt sind, ist der feste Formfaktor für größere Jährlichkeiten als ca. 100 a möglicherweise nicht mehr gerechtfertigt.

Die Übertragung des Koutsoyiannis-Ansatzes auf die Hochwasserfüllen des Beispieldatensatzes, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ermöglicht die Anpassung einer Verteilungsfunktion an die Jahresserie der Hochwasserfüllen. Die ermittelte Verteilungsfunktion deckt den gesamten Wertebereich ab und ist als Randverteilung für die Copula-Auswertung geeignet. Diese sehr pragmatische Herangehensweise sollte in der Zukunft jedoch durch systematische Untersuchungen geprüft werden. Analog z. B. zu KLEEBERG & SCHUMANN (2001) werden auch für die Füllenstatistik Konventionen zur Abschätzung extremer Hochwasserfüllen benötigt. Entsprechende Untersuchungen könnten einen wichtigen Beitrag zur wasserwirtschaftlichen Praxis liefern und auch Optionen zur Ableitung von Regionalisierungsprodukten für Hochwasserfüllen eröffnen.

3.4 Anpassung und Auswahl der Copula-Modelle

Zur Ermittlung der am besten geeigneten Copula wurden Gütemaße berechnet, sowie Kendall-Plots (K-Plots) und Copula-Streudiagramme erzeugt. Die Auswertung der Gütemaße (Tab. 1) zeigt, dass die Gumbel-Copula sowohl die kleinsten Sn- als auch Rn-Werte wie auch die größten p-Werte aufweist und damit von den betrachteten am besten abschneidet. Die Frank- und Clayton-Copula weisen bei Rn ähnliche Werte auf, allerdings ist der p-Wert der Clayton-Copula sogar unterhalb des gewählten Grenzwerts von 0,05, so dass als Alternative zur Gumbel-Copula anhand der Gütemaße die Frank-Copula plausibler erscheint. Dort ist Sn auch deutlich geringer als bei der Clayton-Copula. Insgesamt sind die Gütekriterien jedoch schwer interpretierbar, da Erfahrungen über "gute" Wertebereiche fehlen und die Relevanz von Unterschieden auf den Nachkommastellen kaum beurteilt werden kann.

Ähnliches gilt für die Kendall-Plots (K-Plots). Die Grafik zeigt, dass der Verlauf der aus beobachteten Daten generierten H_i

Tabelle 1
 Statistische Gütemaße Sn und Rn für die Anpassung der drei untersuchten Copulamodelle an die verfügbaren Daten. Die ermittelten p-Werte basieren auf 100.000 Wiederholungen. Der Copulaparameter wurde durch Inversion von Kendall's τ geschätzt.
Goodness of fit measures Sn and Rn for the three copula models that were fitted to the data. The given p-values are based on 100,000 random samples. The copula parameter was estimated by inversion of Kendall's τ .

Copula	Sn		Rn	
	Wert	p-Wert	Wert	p-Wert
Gumbel	0,011	0,95	0,120	0,33
Frank	0,019	0,27	0,278	0,08
Clayton	0,037	<0,01	0,256	0,01

(schwarze Punkte in Abb. 4, links) am besten zu den H_i , die an die Beobachtungen angepassten Gumbel- und Frank-Copulas passt. Allerdings sind die visuellen Unterschiede gering. Zudem stellt sich die Frage, inwiefern die H_i der größten Ereignisse belastbare Entscheidungskriterien im Extrembereich darstellen (das Problem tritt analog auch bei der Interpretation der plotting positions in der univariaten Extremwertstatistik auf). Im unteren Wertebereich bis etwa $W_{i:n} \leq 0,4$ sind die angepassten Copulamodelle graphisch nicht unterscheidbar. Auffällig ist, dass die Abweichungen zur Clayton-Copula am größten sind und diese, analog zu den Ergebnissen der Gütemaße, am ungünstigsten scheint. Die Unterscheidbarkeit der angepassten Copulas im K-Plot erhöht sich deutlich, wenn man in Analogie zu Darstellungen aus der univariaten Extremwertstatistik die y-Achse logarithmiert und die Jährlichkeit aufträgt (Abb. 4, rechts). In dieser Darstellung wird deutlich, dass die Gumbel-Copula für Hochwasser mit großen Wiederkehrzeiten von den betrachteten Copulamodellen die beste Anpassung bietet, während sich die Modelle im Bereich kleiner ca. HQ2 kaum voneinander unterscheiden.

In den Streudiagrammen werden Unterschiede in der Copula-Form, den Isolinien und der statistischen Einordnung historischer Ereignisse besonders deutlich. Bei der Gumbel-Copula (Abb. 5, rechts) nimmt die Streuung der synthetisch generierten Daten (graue Punktwolke) zu den Extremen hin ab, da dort eine hohe Abhängigkeit der beiden Variablen unterstellt wird. Die Isolinien (blaue Linien) gleicher Jährlichkeit beschreiben innerhalb der Punktwolke eine relativ spitze 90°-Kurve und verlaufen davor und danach waagrecht bzw. senkrecht. Aufgrund der gewählten Abhängigkeitsstruktur werden die Ereignisse der Jahre 1999

und 2005 als 100- bis 200-jährliche Ereignisse eingeordnet. Bei der Frank-Copula (Abb. 5, Mitte) ist die Punktdichte entlang der Winkelhalbierenden durchgehend hoch, da keine gewichtete Abhängigkeit unterstellt wird. Die Isolinien der kleinen Jährlichkeiten verlaufen dadurch etwa kreisförmig, wobei sich mit zunehmender Jährlichkeit ein ausgeprägtes Plateau einstellt. Entsprechend wird Lastfällen wie dem 100-jährlichen Ereignis ein sehr weiter Wertebereich zugeordnet. Besonders auffällig ist, dass dem 1999er und dem 2005er Ereignis, im Gegensatz zur Gumbel-Copula eine Jährlichkeit von 500 a bis 1.000 a zugeordnet wird. Die Clayton-Copula (Abb. 5, links) ist sehr ähnlich zur Frank-Copula mit dem Unterschied, dass die Abhängigkeit im kleinen Wertebereich höher und die Streuung der Punktwolke dort geringer ist. Der Verlauf der Isolinien ist ähnlich zur Frank-Copula. Auffällig ist allerdings, dass die kleineren Beobachtungen nicht mehr im Bereich der synthetischen Punktwolke liegen. Dies ist auf die verwendete Randverteilung für die Scheitel zurückzuführen, die im Bereich häufiger Hochwasser keine gute Anpassung an die Beobachtungen geliefert hat (siehe Diskussion in Kap. 3.2). Den historischen Ereignissen werden durch die Clayton-Copula noch größere Jährlichkeiten von mehr als 1.000 a zugeordnet.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Auswertungen wird hier die Gumbel-Copula als beste Vertreterin eingestuft. Ein starker positiver Zusammenhang zwischen Scheitel und Fülle bei seltenen Hochwassern – wie ihn die Gumbel-Copula unterstellt – erscheint aus hydrologischer Sicht in diesem Einzugsgebiet grundsätzlich plausibel. Diese Einschätzung deckt sich auch mit anderen publizierten Studien, in denen ebenfalls die Gumbel-Copula als beste Vertreterin identifiziert wurde z. B. bei

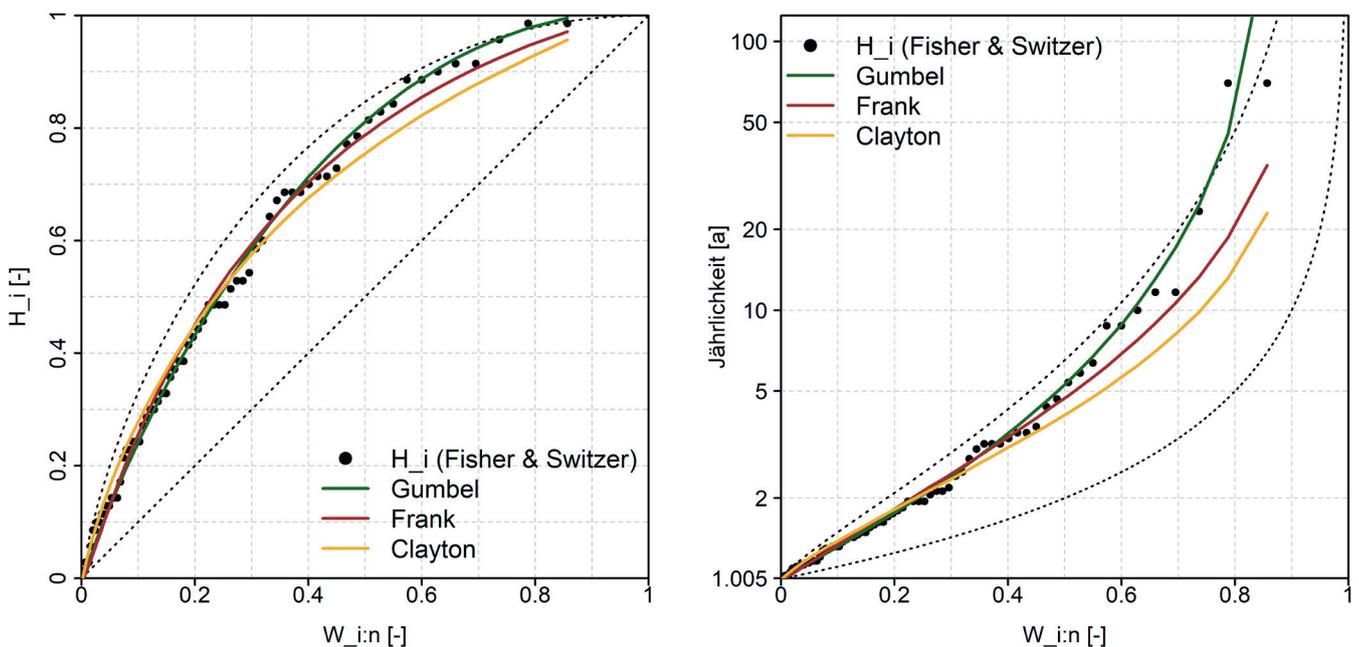


Abbildung 4
 Kendall-Plot (K-Plot) der multivariaten empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (H_i) der Beobachtungen und Erwartungswert der H_i aus an die Daten angepassten Gumbel-, Frank- und Clayton-Copulas basierend auf 1.000 Wiederholungen. Die gepunktete Linie beschreibt den theoretischen Verlauf der H_i , wenn die Scheitel und Füllen perfekt korreliert wären, die gestrichelte Linie den Verlauf, wenn beide unabhängig wären. Die rechte Darstellung zeigt den gleichen K-Plot mit logarithmierter y-Achse und Darstellung der Jährlichkeit.
 Kendall-Plot (K-Plot) of multivariate empirical non-exceedance probability (H_i) of observation data and expected value of H_i calculated from fitted Gumbel, Frank and Clayton copulas based on 1,000 iterations. The dotted line shows the theoretical curve if peak flow and flood volume were perfectly correlated, the dashed line shows the theoretical curve, if both were independent. The right figure shows the same K-Plot with a logarithmised y-axis and return periods.

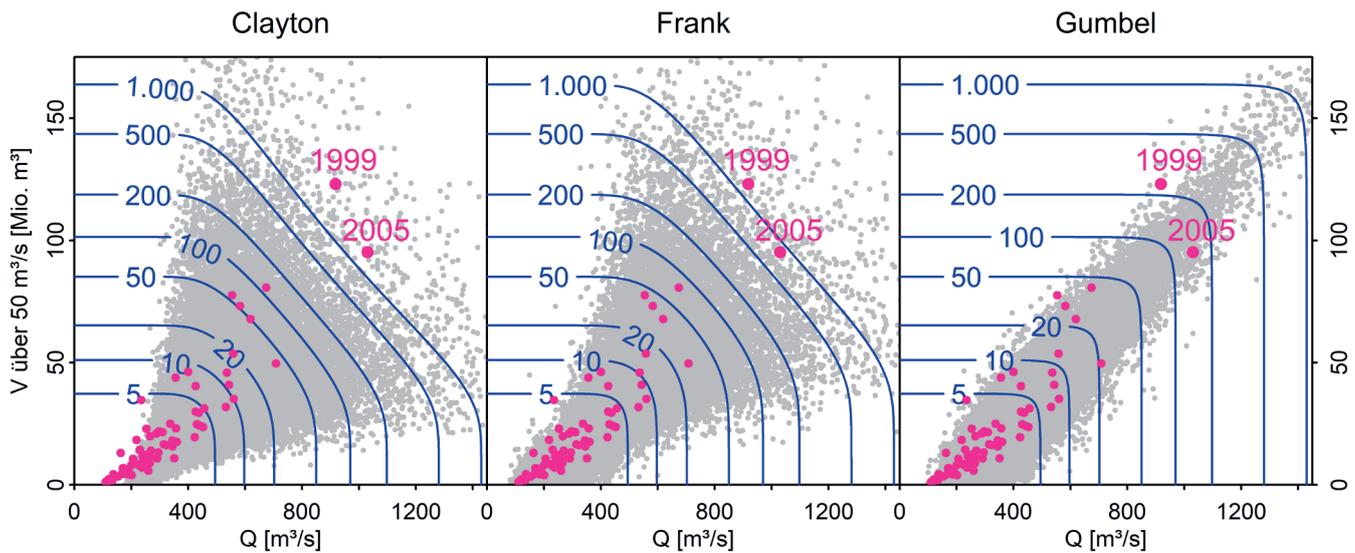


Abbildung 5

Zufällig aus der Copula gezogene und auf Basis von Randverteilungen für die Scheitel und Füllen in den realen Wertebereich umgerechnete Wertepaare für an die Beobachtungen angepasste Clayton-, Frank-, und Gumbel-Copulas (graue Punktwolke, jeweils 100.000 Punkte). Die blauen Linien sind Isolinien gleicher Jährlichkeit. Die pinken Punkte zeigen die Beobachtungen, auf deren Basis die Copula abgeleitet wurde. Die Hochwasser von 1999 und 2005 sind gesondert markiert. R-Code zum Erstellen ähnlicher Abbildungen kann den Anhängen 3 bis 5 entnommen werden.

Randomly sampled data pairs from the fitted Clayton, Frank and Gumbel copulas that were transformed into the real data range using the estimated marginal distributions for peak flow and flood volume (grey point clouds). The blue lines are isolines of similar return period. The pink points show the observations used to derive the marginal distributions and the copula parameter. The 1999 and 2005 floods are highlighted. R code to create similar figures is given in appendices 3 to 5.

Standortsicherheitsuntersuchungen an Talsperren (DE MICHELE et al., 2005) oder für bivariate Häufigkeitsanalysen von Scheiteln und Füllen (SRAJ et al., 2014). In der Literatur finden sich aber auch Untersuchungen, in denen anderen Modellen der Vorzug gegeben wurde, z. B. der Clayton-Copula (CHOWDHARY et al., 2011). Viele weitere Copula-Familien sind bspw. auch über das R-Paket *VineCopula* (NAGLER et al., 2023) einfach zugänglich. Testweise Auswertung der dort verfügbaren Copulas haben jedoch keinen relevanten Mehrwert ergeben und nur neue Fragen aufgeworfen, z. B.: Ist der Einsatz zwei-parametrischer Copulas angesichts geringer Stichprobenumfänge gerechtfertigt? Sind radialsymmetrische Korrelationsstrukturen hydrologisch plausibel? – wodurch die Ansätze letztlich wieder verworfen wurden.

Im Hinblick auf die Bemessung zeigt die Auswertung vor allem deutlich, dass die Verwendung einzelner historischer Ereignisse für die Bauwerksdimensionierung sehr einseitig sein kann. Während das Hochwasser von 1999 zwar etwa einen 100-jährlichen Scheitel aufweist, lieferte es eine etwa 200-jährliche Fülle. Das Hochwasser im Jahr 2005 hingegen hatte nach dieser Auswertung einen mehr als 100-jährlichen Scheitel, aber eine weniger als 100-jährliche Fülle. Bemessungen auf Basis historischer Daten können daher stark von der verfügbaren Datengrundlage (Stichprobe) abhängen und der Verlauf der Isolinien zeigt eindrücklich, dass auch zahlreiche andere Kombinationen mit gleicher Auftretenswahrscheinlichkeit möglich sind.

3.5 Einordnung der Modellierungsergebnisse in den statistischen Kontext

Analog zur Einordnung historischer Hochwasser können auf Basis von Copula-Auswertungen auch Ganglinien aus der NA-

Modellierung hinsichtlich ihrer kombinierten Jährlichkeit von Scheiteln und Füllen beurteilt werden. Dazu werden die mit dem NA-Modell generierten Kombinationen von Scheiteln und Füllen über dem Grenzwert von 50 m³/s für die drei häufigsten Bemessungsjährlichkeiten 100 a (grün), 1.000 a (rot) und 10.000 a (gelb) in dem Streudiagramm auf Basis der Gumbel-Copula ergänzt (Abb. 6). Die verschiedenen Punkte kennzeichnen dabei jeweils die Modellierungsergebnisse für unterschiedliche Niederschlagsdauerstufen der entsprechenden Jährlichkeit. Die Position der Datenpunkte hinsichtlich des Scheitels ergibt sich dabei durch die Kalibrierung des Modells auf den HQ₁₀₀-Scheitel nach dem in Kapitel 2.6 beschriebenen Vorgehen ("Bemessungskonzept"). Mit zunehmender Dauerstufenlänge steigen Abflussscheitel und Volumen, wobei der Verlauf der grünen Punkte bzgl. des Abflussscheitels auf dem Niveau von ca. 1.000 m³/s sein Maximum (D = 72 h, Punkt B) erreicht (maßgebendes Ereignis). Konzeptionell sollte das verursachende Niederschlagsereignis bzgl. seiner Länge etwa mit dem 1 bis 2-fachen der Konzentrationszeit des Gebietes (hier ca. 72 h bis 96 h) übereinstimmen (DYCK & PESCHKE, 1995) und der Scheitel nahe an der Isolinie der entsprechenden Jährlichkeit liegen. Letzteres ist hier nicht der Fall: Das Ereignis ist hinsichtlich seiner Kombination von Scheitel- und Fülle eher vergleichbar mit dem Hochwasser von 1999, dem die Copulaauswertung eine kombinierte Jährlichkeit von etwa 200 a zuordnet. Das simulierte 48 h-Ereignis (Punkt A) liegt näher an der Isolinie und entspricht einem 50 bis 100-jährlichen Ereignis. Für die Simulation der 1.000- (Punkte C und D) und 10.000-jährlichen Ereignisse (Punkte E und F) zeigt sich ein ähnliches Bild. Keines der mit den Annahmen des "Bemessungskonzepts" simulierten Ereignisse liefert demnach eine plausible Scheitel-Füllen-Kombination, die exakt der geforderten Jährlichkeit entspricht.

Da die Copula-Auswertung einer bedeutenden Unsicherheit unterliegt, können prinzipiell auch abseits der Isolinien liegende Ereignisse als Bemessungsereignisse geeignet sein. Diese Art der Auswertung kann aber verwendet werden, um die Wahl geeigneter Ganglinien deutlich einzuschränken.

Dies ist insbesondere im Hinblick auf die für die Bemessung von Speichern wichtige Fülle relevant, da NA-Modelle üblicherweise nur auf die Scheitel kalibriert werden, Volumenstatistiken weitgehend fehlen und sich aus dem Anstieg der (KOSTRA-) Niederschlagshöhe mit zunehmender Dauerstufe unweigerlich kontinuierlich höhere Abflussvolumina ergeben. In dem dargelegten Beispiel veranschaulichen die Isolinien eindrucksvoll, dass vom Modell jenseits des Abflussscheitelmaximums in allen betrachteten Jährlichkeiten in den längeren Dauerstufen Füllen mit erheblich größeren Jährlichkeiten erreicht werden und analoge Muster und Verläufe wurden in internen Auswertungen auch bei anderen Daten, Speichern und NA-Modellen gefunden. Es bildet sich beim Abflussvolumen, anders als beim Abflussscheitel kein lokales Maximum und das in der Praxis häufig angewandte Vorgehen, alle verfügbaren Dauerstufen zu betrachten, würde eine erhebliche Überdimensionierung des zu bemessenden Bauwerks bedeuten.

Das gezeigte Beispiel verdeutlicht das große Potenzial von Copula-Auswertungen für die Praxis: Sie erlauben die Identifizierung von z. B. 100-jährlichen Kombinationen von Scheiteln und

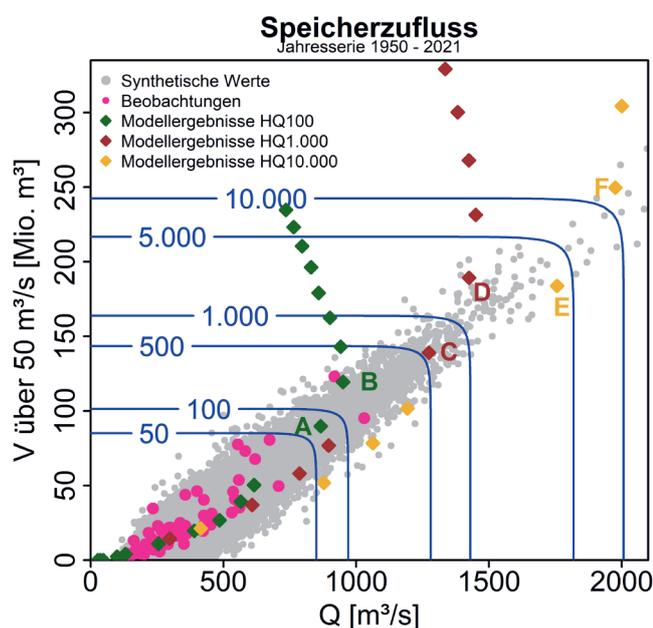


Abbildung 6
 Copula-Streudiagramm aus Abbildung 5 rechts (Gumbel) in dem zusätzlich die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Simulation dargestellt sind. Die einzelnen Punkte repräsentieren die verschiedenen Dauerstufen der einzelnen Jährlichkeiten. Einzelne Ereignisse sind besonders markiert: A: 100 a, 48 h; B: 100 a, 72 h; C: 1.000 a, 48 h; 1.000 a, 72 h; E: 10.000 a, 48 h; F: 10.000 a, 72 h.
 Copula scatter plot from figure 5 right (Gumbel) including the rainfall runoff simulations. The points represent different precipitation durations of the same return period. Some events are marked separately: A: 100 a, 48 h, B: 100 a, 72 h; C: 1,000 a, 48 h; 1,000 a, 72 h; E: 10,000 a, 48 h, F: 10,000 a, 72 h.

Füllen und im Umkehrschluss den Ausschluss nicht plausibler Lastfälle. Plausible Fälle sind durch Datenpunkte gekennzeichnet, die im "kritischen" Bereich der Isolinien liegen. Gemeint ist damit der gekrümmte Teil, in dem die Isolinien innerhalb der Punktwolke und nicht vertikal oder senkrecht verlaufen (Abb. 6). Im vorliegenden Beispiel werden die Füllen der entsprechenden Jährlichkeiten in ähnlichen Dauerstufen erreicht wie die Scheitel. Dadurch fällt der "kritische" Bereich der Isolinien klein aus, es sind aber verschiedene Kombinationen möglich. Der "kritische" Bereich wird allerdings auch von der Copulaformulierung bestimmt und ist z. B. bei Frank-Copulas erheblich größer als bei der Gumbel-Copula.

Die Auswertung zeigt auch, dass die ohnehin problematischen Annahmen des "Bemessungskonzepts", wie z. B. die Gleichsetzung der Jährlichkeiten von Niederschlag und Abfluss, aber auch die synthetischen Niederschlagsverläufe insbesondere bei der Simulation sehr langer Dauerstufen zu Ergebnissen führen können, die nicht mehr plausibel und für die Bemessung ungeeignet sind. Eine Diskussion und Fortschreibung des "Bemessungskonzeptes" erscheint uns daher sinnvoll und dringlich.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Bemessung von Rückhaltebauwerken erfordert Ganglinien, wobei nicht nur die Jährlichkeit des Abflussscheitels, sondern auch die der Fülle relevant ist. Über die statistischen Eigenschaften von Hochwasserfüllen ist – im Gegensatz zu den Scheitelwerten – jedoch meist nichts bekannt. In der Konsequenz ist die Auswahl von Ganglinien für Bemessungsaufgaben schwierig und subjektiv. Hinzu kommt, dass Scheitel und Volumen der Ganglinie nicht unabhängig voneinander sind, und deshalb bei der Bemessung geeignete Kombinationen beider Größen benötigt werden.

Zur gemeinsamen statistischen Betrachtung von Scheitel und Volumen bieten sich Auswertungen auf Basis von Copulas an. Diese erlauben, im Grunde analog zur univariaten Extremwertstatistik, die multivariate Betrachtung verschiedener Variablen. Sie sind heute in der hydrologischen Forschung, aber noch nicht in der wasserwirtschaftlichen Praxis etabliert. Letzteres liegt auch daran, dass bisher Handreichungen für die praktische Umsetzung fehlen und kaum kommerzielle Softwareprodukte verfügbar sind.

Als Beitrag zum Praxistransfer der Methodik zeigt der Artikel, wie Copulaansätze für die Bemessung von Speichern und Rückhaltebauwerken praktisch nutzbar gemacht werden können. Dazu werden anhand eines Musterdatensatzes die Randverteilungen für Scheitel und Füllen abgeleitet, verschiedene Copulamodelle verglichen und historische Hochwasserereignisse des Datensatzes statistisch eingeordnet. Als zusätzliches Anwendungsbeispiel wird gezeigt, wie NA-Modellsimulationen für eine Speicherbemessung hinsichtlich ihrer statistischen Eigenschaften eingeordnet und Bemessungsganglinien begründet ausgewählt bzw. ausgeschlossen werden können.

Um die fachliche Diskussion der vorgestellten Methode in der deutschsprachigen Fachgemeinschaft zu stimulieren und ihre Verbreitung in der Bemessungspraxis und die Entwicklung von Standards zu fördern, beinhaltet der Artikel zudem ein Praxisbeispiel mit Testdaten. Der Anhang enthält lauffähige, ausführbare

Skripte in der frei verfügbaren Programmiersprache R, die zum Nachvollziehen des Vorgehens oder als Blaupause für ähnliche Fragestellungen verwendet werden können.

Da sich analog zur univariaten Extremwertstatistik die Wahl des Copulamodells sensitiv auf das Ergebnis auswirken kann, werden verschiedene Ansätze zur Auswahl von Copulas und der Beurteilung ihrer Anpassung vorgestellt und diskutiert. Unter der Berücksichtigung von sowohl statistischen, als auch hydrologischen Kriterien wird in dem vorgestellten Fallbeispiel die Gumbel-Copula als beste Vertreterin ausgewählt. Neu eingeführt werden Copula-Streudiagrammen mit Isolinien gleicher Jährlichkeit. Mit diesen lassen sich nicht nur historische Ereignisse einordnen, sondern auch Simulationen hydrologischer Modelle und im Umkehrschluss nicht plausible Lastfälle ausschließen. Der Einsatz von Copulas bietet daher vielfältige und erhebliche Potenziale mit großem Mehrwert für die Anwendungspraxis.

Herausfordernd ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch die Ableitung von Serien von Hochwasserfüllen. Für Einzelfälle wie die Bemessung von Rückhaltebauwerken konnten mit einem festen Schwellenwert zur Ereignisabgrenzung vereinfachend plausible Ergebnisse erzielt werden. Eine breitere, automatisierte Anwendung, z. B. für viele Pegel ist damit gegenwärtig aber bedauerlicherweise noch nicht möglich. Ursächlich hierfür sind jedoch nicht die Copulas, sondern das Fehlen belastbarer Techniken und praxistauglicher Werkzeuge zur Ereignisabgrenzung. Diesbezüglich besteht entsprechender Handlungs- und Entwicklungsbedarf. Gleiches gilt für die Etablierung wissenschaftlich anerkannter Standards für die Füllenstatistik.

Perspektivisch ist beabsichtigt Copulas auch für andere Fragestellungen zu testen und anzuwenden, z. B. zur Ermittlung von Überlagerungswahrscheinlichkeiten von Wellen an Flussmündungen, der Bemessung von Schöpfwerken oder den Einsatz der Methode zur Erzeugung synthetischer Ganglinien. Da sich Copula-Ansätze leicht auf höherdimensionale Ebenen übertragen lassen, können damit auch weitere Gebiets- oder Einzugsgebietseigenschaften wie Wellenanlaufzeiten, die Vorfeuchte im Gebiet oder die Jahreszeit berücksichtigt werden. Auch der Einsatz von Copulas zur Kalibrierung oder Validierung hydrologischer Modelle für Bemessungsaufgaben erscheint vielversprechend.

Summary and Conclusions

The design of retention structures does not only require discharge values with defined return periods but also flood volumes with defined statistical properties. The latter are typically unknown as available methods and recommendations focus on peak flow. In consequence, the selection of design hydrographs is often difficult and subjective. For instance, the inflow hydrograph with the highest peak may not necessarily represent the critical case for the design of retention volumes and vice versa. As peak and volume of the hydrograph are dependent, appropriate combinations of both parameters are vital for robust design purposes. Copulas offer techniques to jointly consider both variables. Such multivariate analyses are well established in hydrological research, although not yet adopted in water engineering practice.

One goal of the study was to demonstrate how to apply a copula approach to real-world data. We achieved this by deriving marginal distributions for annual series of peak flow and flood volumes using a sample data set and by fitting and comparing different copula models. Additionally, we used the results to assess historical flood events and to evaluate the results of a rainfall-runoff model.

To stimulate discussions about the use of copulas within the community, to foster their integration into design practices, and to promote the development of standards, the article also includes a practical example with test data and an appendix with executable scripts in the freely available programming language R.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Alle während dieser Studie erzeugten oder analysierten Daten sind in diesem publizierten Artikel und in den dazugehörigen ergänzenden Informationsdateien enthalten.

Danksagung

Unser Dank gilt den zwei anonymen Gutachtern und Editoren, die durch ihre Hinweise ganz wesentlich zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

Anschriften der Verfasser

Nicolas Dalla Valle

Dr. Simon Paul Seibert

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

nicolas.dallavalle@lfu.bayern.de

simon.seibert@lfu.bayern.de

Literaturverzeichnis

- ASQUITH, W. (2021): Imomco. L-Moments, Censored L-Moments, Trimmed L-Moments, L-Comoments, and Many Distributions. Version 2.3.7. R-Paket.
- ASQUITH, W. (2024): General Bivariate Copula Theory and Many Utility Functions. Version 2.2.3. R-Paket.
- BELZILE, L. (2023): Liouville Copulas. Version 1.0.6. R-Paket.
- BENDER, J. (2015): Zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen an Flussmündungen mit Verfahren der multivariaten Statistik: Universität Siegen (Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, Bd. 9).
- BENDER, J., T. WAHL, C. MUDERSBACH & J. JENSEN (2013): Flood Frequency Analysis at River Confluences – Univariate vs. Multivariate Extreme Value Statistics. Proceedings of the International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER) 2013, 316–329.
- BENDER, J., T. WAHL & J. JENSEN (2014): Multivariate design in the presence of non-stationarity. *Journal of Hydrology*, 514, 123–130.
- BENDER, J., J. JENSEN, C. MUDERSBACH, B. KLEIN & B. ROTHE (2018): Multivariate Wahrscheinlichkeiten: ein Mehrgewinn – nicht nur für die Wissenschaft. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 11(3): 160–165.
- BLUME, T., E. ZEHE & A. BRONSTERT (2007): Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal* 52(5): 843–862.
- CHOWDHARY, H., L.A. ESCOBAR & V.P. SINGH (2011): Identification of suitable copulas for bivariate frequency analysis of flood peak and flood volume data. *Hydrology Research*, 42(2-3): 193–216.

- CROCHEMORE, L., C. PERRIN, V. ANDRÉASSIAN, U. EHRET, S.P. SEIBERT, S. GRIMALDI et al. (2014): Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal* 60(3): 402–423.
- DE MICHELE, C., G. SALVADORI, M. CANOSSO & A. PETACCIA (2005): Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(1): 50–57.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2004a): DIN 19700-10. Stauanlagen. Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Berlin:Beuth.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2004b): DIN 19700-11. Stauanlagen. Teil 11: Talsperren. Berlin:Beuth.
- DVWK REGELN 112 (1982): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil I: Analyse. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Paul Parey: Hamburg, Berlin.
- DVWK REGELN 113 (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Paul Parey: Hamburg, Berlin.
- DWA-M 552 (2012): Merkblatt DWA-M 552: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA-M 552 (2024, im Gelbdruck): Merkblatt DWA-M 552.: Stochastische und deterministische Wege zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- FISCHER, S. & A.H. SCHUMANN (2018): Berücksichtigung von Starkregen in der Niederschlagsstatistik. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62(4): 248–256.
- FISHER, N.I. & P. SWITZER (1985): Chi-plots for assessing dependence. *Biometrika*, 72(2): 253–256.
- FISHER, N.I. & P. SWITZER (2001): Graphical assessment of dependence: Is a picture worth a 100 tests? *The American Statistician*, 55(3): 233–239.
- GENEST, C. & J.-C. BOIES (2003): Detecting independence with Kendall plots. *The American Statistician*, 57(4): 275–284.
- GENEST, C. & A.-C. FAVRE (2007): Everything you always wanted to know about Copula Modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrological Engineering*, 12(4): 347–368.
- GENEST, C., B. RÉMILLARD & D. BEAUDOIN (2009): Goodness-of-fit-tests for copulas: A review and a power study. *Insurance: Mathematics and Economics*, 44(2): 199–214.
- GENEST, C., W. HUANG & J.-M. DUFOUR (2013): A regularized goodness-of-fit test for copulas. *Journal de la Société Française de Statistique*, 154(1): 64–77.
- GUPTA, H.V., H. KLING, K.K. YILMAZ & G.F. MARTINEZ (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria. Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2): 80–91.
- HOFERT, M., I. KOJADINOVIC, M. MAEHLER, J. YAN, J.G. NEŠLEHOVÁ & R. MORGER (2020): copula. Multivariate Dependence with Copulas. Version 1.0-1. R-Paket.
- JUNGHÄNEL, T., H. ERTEL & T. DEUTSCHLÄNDER (2017): KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Offenbach: Eigenverlag DWD.
- JUNGHÄNEL, T., F. BÄR, T. DEUTSCHLÄNDER, U. HABERLANDT, I. OTTE, B. SHEHU, H. STOCKEL, K. STRICKER, L.-B. THIELE & W. WILLEMS (2022): Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland (MUNSTAR). Synthesebericht. Offenbach: Eigenverlag DWD.
- KLEEBERG, H.-B. & A.H. SCHUMANN (2001): Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. *Wasserwirtschaft*, 91(2): 90–95.
- KOUTSOYIANNIS, D., D. KOZONIS & A. MANETAS (1998): A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency. *Journal of Hydrology*, 206(1-2): 118–135.
- KOUTSOYIANNIS, D. (2004a): Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4): 575–590.
- KOUTSOYIANNIS, D. (2004b): Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591–610.
- LI, R., L. XIONG, C. JIANG, W. LI & C. LIU (2023): Quantifying multivariate flood risk under nonstationary condition. *Natural Hazards*, 116(1), 1161–1187.
- LUDWIG, K. & M. BREMICKER (2006): The water balance model LARSIM. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Bd. 22. Universität Freiburg.
- MALITZ, G. & H. ERTEL (2015): KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlags-höhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 – 2010). Abschlussbericht. Offenbach: Eigenverlag DWD.
- MICHIELS, F. & A. DE SCHEPPER (2008): A copula test space model. How to avoid the wrong copula choice. *Kybernetika*, 44(6): 864–878.
- NAGLER, T., U. SCHEPSMEIER, J. STOEBER, E.C. BRECHMANN, B. GRAELER, T. ERHARDT, C. ALMEIDA, A. MIN, C. CZADO, M. HOFMANN M. KILLICHES, H. JOE & T. VATTER (2023): VineCopula. Statistical Inference of Vine Copulas. Version 2.5.0. R-Paket.
- ÖBMLFUW (Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2011): Leitfaden. Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten. Wien: Eigenverlag.
- POULIN, A., D. HUARD, A.-C. FAVRE & S. PUGIN (2007): Importance of tail dependence in bivariate frequency analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4): 394–403.
- R CORE TEAM (2021): R. A language and environment für statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Wien, Österreich.
- RP STUTTGART (2012): Hochwassergefahrenkarte Baden-Württemberg – Beschreibung der Vorgehensweise zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg.
- SALVADORI, G., F. DURANTE, C. DE MICHELE, M. BERNARDI & L. PETRELLA (2016): A multivariate copula-based framework for dealing with hazard szenarios and failure probabilities. *Water Resources Research*, 52(5): 3701–3721.
- SCHUMANN, A.H. & S. FISCHER (2023): Sind Bemessungsabflüsse nach dem Kleeberg/Schumann-Verfahren noch begründet? *WASSERWIRTSCHAFT*, 113(10): 10–14.
- SEIBERT, S.P., U. EHRET & E. ZEHE (2016): Disentangling timing and amplitude errors in streamflow simulations, *Hydrology and Earth System Science*, 20(9): 3745–3763.
- SKLAR, A. (1959), "Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges", *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 8: 229–231.
- SKLAR, A. (1997): Random variables, distribution functions, and copulas – a personal look backward and forward. In: L. Rüschendorf, B. Schweizer, M. Taylor (Hrsg.): *Distributions With Fixed Marginals & Related Topics*.

- SRAJ, M., N. BEZAK & M. BRILLY (2014): Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River. *Hydrological Processes*, 29(2): 225–238.
- TARASOVA, L., S. BASSO, M. ZINK & R. MERZ (2018): Exploring Controls on Rainfall-Runoff Events. 1. Time Series-Based Event Separation and Temporal Dynamics of Event Runoff Response in Germany. *Water Resources Research* 54 (10): 7711–7732.
- TOOTOONCHI, F., M. SADEGH, J.O. HAERTER, O. RÄTY, T. GRABS & C. TEUTSCHBEIN (2022): Copulas for hydroclimatic analysis: A practice-oriented overview. *WIREs Water*, e1579: 1–28.
- VERWORN, H.-R. & I. KUMMER (2003): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Abschlussbericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau. Universität Hannover. Hannover.

Anhang 1 - Codebeispiel für eine Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) an vorgegebene Hochwasserquantile

```

# Benötigte Bibliotheken
library(lmomco)

# Kostenfunktion
# Minimierung des RMSE zwischen berechneten und vorgegebenen Quantilen
costfun <- function(par, data) {
  mod <- quagev(data[,1], vec2par(par, type = "gev"))
  sqrt((sum((mod - data[,2])^2)) / length(data[,2]))
}

# Vektor mit Unterschreitungswahrscheinlichkeiten
PU <- 1 - 1 / c(5, 10, 20, 50, 100, 1000, 10000)

# Vektor mit zugehörigen Hochwasserquantilen
HQT <- c(500, 600, 700, 850, 950, 1450, 2000)

# data.frame mit Eingangsdaten
data <- data.frame(PU = PU,
                   HQT = HQT)

# Parameteroptimierung
q_parameters <- optim(par = c(1, 1, -0.5),
                    fn = costfun,
                    data = data,
                    method = "L-BFGS-B",
                    lower = c(1, 1, -0.99),
                    upper = c(1000, 1000, 0))$par

# Kontrollplot
plot(data$HQT, log10(1/(1 - data$PU)), pch = 19, col = "red", yaxt = "n",
     ylab = "Jährlichkeit [a]", xlab = "Q [m³/s]",
     xlim = c(500, 2100), ylim = log10(c(4, 12500)))
axis(side = 2, at = log10(1/(1 - data$PU)),
     labels = c("5", "10", "20", "50", "100", "10e3", "10e4"))
lines(quagev(seq(0.8, 0.99999, by = 0.00001), vec2par(q_parameters, type = "gev")),
     log10(1/(1 - seq(0.8, 0.99999, by = 0.00001))))

```

R-Codebeispiel für die Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) an vorgegebene Hochwasserquantile.
R code example for fitting the generalised extreme value distribution (GEV) to given flood quantiles.

Anhang 2 - Codebeispiel für eine Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) mit fixiertem Formparameter

```
# Benötigte Bibliotheken
library(lmomco)

# Funktion zur Ermittlung der GEV-Parameter
pargev2 <- function(lmom) {
  # Funktion gekürzt. Basiert auf pargev() aus dem Paket lmomco (ASQUITH 2021)
  para <- rep(NA, 3)
  names(para) <- c("xi", "alpha", "kappa")
  if(length(lmom$L1) == 0) lmom <- lmorph(lmom)
  G <- -0.1
  para[3] <- G
  GAM <- exp(lgamma(1 + G))
  para[2] <- lmom$L2 * G / (GAM * (1 - 2^(-G)))
  para[1] <- lmom$L1 - para[2] * (1 - GAM) / G
  return(list(type = "gev", para = para, source = "pargev"))
}

# Vektor mit zu den Jahreshöchstwerten korrespondierenden Füllen über 50 m³/s
# Werte in Mio. m³
vmax_vector <- c(5.9, 4.4, 2.3, 18.4, 23.7, 46.2, 24.8, 8.0, 4.4, 4.0, 14.4,
  11.8, 1.2, 3.4, 67.8, 53.7, 10.7, 21.9, 6.8, 73.2, 4.3, 1.9,
  7.6, 34.7, 43.9, 23.0, 49.7, 8.9, 15.8, 14.0, 77.6, 4.9, 31.3,
  9.3, 45.9, 1.2, 8.1, 5.8, 8.5, 7.1, 12.3, 24.2, 21.6, 2.3,
  19.9, 16.6, 21.0, 6.2, 123.1, 16.3, 25.0, 31.9, 18.2, 6.8,
  95.2, 17.6, 10.7, 13.3, 10.8, 35.2, 19.5, 10.9, 80.7, 30.0,
  13.1, 11.8, 23.1, 2.2, 40.4, 29.5, 40.9)

# Berechne Plotting Positions nach Weibull
pu_weibull_v <- (1:length(vmax_vector) / (length(vmax_vector) + 1))

# Kontrollplot
plot(sort(vmax_vector), log10(1/(1 - pu_weibull_v)),
  xlim = c(0, 300), ylim = log10(c(1.005, 12500)),
  yaxt = "n", ylab = "Jährlichkeit", xlab = "V über 50 m³/s [Mio. m³]")
axis(side = 2, at = log10(c(2, 5, 10, 20, 50, 100, 1000, 10000)),
  labels = c("2", "5", "10", "20", "50", "100", "10e3", "10e4"), las = 2)
lines(quagev(seq(0.5, 0.99999, by = 0.00001), pargev2(lmom(vmax_vector))),
  log10(1/(1 - seq(0.5, 0.99999, by = 0.00001))),
  col = "darkorange2")
points(quagev(c(1 - 1 / c(1000, 10000)), pargev2(lmom(vmax_vector))),
  log10(c(1000, 10000)),
  pch = 19, col = "darkorange2")
```

R-Codebeispiel für die Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) an die Jahresserie der Hochwasserfüllen mit fixiertem Formparameter (G) von 0,1.

R code for fitting the generalised extreme value distribution (GEV) to the annual series of flood volumes using a fixed shape parameter (G) of 0.1.

Anhang 3 - Codebeispiel für die Berechnung der Gütemaße Sn und Rn und die Definition einer Copula

```

# Benötigte Bibliotheken
library(copula)
library(lmomco)

# Daten
data <- data.frame(
  # Vektor mit Jahreshöchstwerten des Abflusses
  qmax = c(179, 137, 125, 218, 452, 400, 430, 227, 167, 201, 230, 266,
           114, 153, 619, 558, 206, 297, 170, 582, 187, 134, 249, 235,
           356, 253, 708, 265, 345, 269, 554, 193, 456, 241, 536, 110,
           200, 260, 222, 237, 250, 442, 310, 120, 266, 314, 288, 180,
           918, 323, 337, 532, 344, 174, 1030, 360, 250, 295, 291, 560,
           423, 351, 674, 426, 163, 239, 357, 122, 426, 437, 543),
  # Vektor mit zu den Jahreshöchstwerten korrespondierenden Füllen über 50 m³/s
  vmax = c( 5.9, 4.4, 2.3, 18.4, 23.7, 46.2, 24.8, 8.0, 4.4, 4.0,
           14.4, 11.8, 1.2, 3.4, 67.8, 53.7, 10.7, 21.9, 6.8, 73.2,
           4.3, 1.9, 7.6, 34.7, 43.9, 23.0, 49.7, 8.9, 15.8, 14.0,
           77.6, 4.9, 31.3, 9.3, 45.9, 1.2, 8.1, 5.8, 8.5, 7.1,
           12.3, 24.2, 21.6, 2.3, 19.9, 16.6, 21.0, 6.2, 123.1, 16.3,
           25.0, 31.9, 18.2, 6.8, 95.2, 17.6, 10.7, 13.3, 10.8, 35.2,
           19.5, 10.9, 80.7, 30.0, 13.1, 11.8, 23.1, 2.2, 40.4, 29.5,
           40.9)
)

# Berechne Gütemaße
# Langsam! - ggf. Zahl der Iterationen vermindern
# Sn
gofCopula(gumbelCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")
gofCopula(francCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")
gofCopula(claytonCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")

# Rn
gofCopula(gumbelCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")
gofCopula(francCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")
gofCopula(claytonCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")

# Definiere Copula
# Berechne empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (pseudo observations)
data_pobs <- pobs(data)

# Ermittlung des Copulaparameters
# Copulaformulierung: Gumbel-Copula
# Schätzmethode: Inversion von Kendall's tau
fitted_copula <- gumbelCopula(param = coefficients(
  fitCopula(
    gumbelCopula(dim = 2),
    data_pobs,
    method = "itau")
  ),
  dim = 2)

```

R-Codebeispiel für Berechnung der Gütemaße Sn und Rn und die Definition einer an die Beispieldaten angepassten Gumbel-Copula.
 R code for calculating the GOF-measures SN and RN and definition of a Gumbel copula based on the example data set.

Anhang 4 - Codebeispiel für die Erstellung eines Kendall-Plots

```

# Dies ist eine Fortsetzung des Codebeispiels aus Tabelle 3.
# Zum Ausführen muss der folgende Code unter dem Code aus Tabelle 3 ergänzt werden.

# Kendall-Plot
# Die nachfolgende Berechnung von K0, H und W basiert auf der Funktion K.plot()
# aus dem R-Paket lcopula (Belzile 2022)
# Die Funktion wurde ursprünglich erstellt auf Basis von Code von C. Genest.

# Funktion zur Berechnung von K0 aus Genest & Favre (2007)
K0_fun <- function(w, i, n) {
  K0 <- w - w * log(w)
  -log(w) * w * K0^(i - 1) * (1 - K0)^(n - i)
}
# Funktion zur Berechnung der Empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Copula
# Fisher & Switzer 1985, 2001, Genest & Favre 2007
H_fun <- function(data) {
  n <- dim(data)[1]
  d <- dim(data)[2]
  out <- rep(NA, n)
  tmp <- paste("data[,", 1:d, "] <= data[i,", 1:d, "]")
  cmdnd <- parse(text = paste(tmp, collapse = " & "))
  for (i in 1:n) {
    subbb <- sum(eval(cmdnd)) - 1
    out[i] <- subbb/(n - 1)
  }
  out
}

# Berechnung
n <- length(data$Qmax) # Zahl der Beobachtungen

# K0
w <- seq(0.01, 1, 0.01)
K_null <- w - w*log(w)

# Erwartungswert der i-ten Ordnungsstatistik unter der Annahme von
# Unabhängigkeit zwischen den Beobachtungen
W <- sapply(1:n, FUN = function(i) {
  factorial(n) / (factorial(i - 1) * factorial(n - i)) *
  integrate(K0_fun, lower = 0, upper = 1, i = i, n = n,
    subdivisions = 10000, rel.tol = .Machine$double.eps^0.001)$value
})
# Sortierte Hi der Beobachtungen
H <- sort(H_fun(data))
# Ziehe 1.000mal n zufällige Datenpaare aus der angepasste Gumbel-Copula
# und berechne für jede Ziehung H.
H_syn <- matrix(nrow = n, ncol = 1000)
for (i in 1:1000) {
  syn <- rCopula(n, fitted_copula)
  H_syn[, i] <- sort(H_fun(syn))
}
# Berechne Erwartungswert der H-Werte
H_sim_mean <- apply(H_syn, 1, FUN = mean)

# Plotting
plot(x = 1, y = 1, type = "n",
  xlab = "Wi:n", ylab = "Hi", xlim = c(0, 1), ylim = c(0, 1))
abline(h = 0, lty = 2)
abline(0, 1, lty = 2)
lines(w, K_null, lty = 2)
# Die Linie zeigt den Erwartungswert der auf Basis der angepassten Copula ermittelten
H-Werte.
lines(W, H_sim_mean, col = "steelblue4", lwd = 2, lty = 1)
points(W, H, pch = 19)
legend("bottomright", legend = c("H_i (Fisher & Switzer)", "angepasste Gumbel-Copula"),
  lty = c(0, 1), lwd = c(NA, 2), pch = c(19, NA), col = c("black", "steelblue4"))

```

R-Codebeispiel für die Erstellung eines Kendall-Plots.
R code for creating a Kendall plot.

Anhang 3 - Codebeispiel für die Berechnung der Gütemaße Sn und Rn und die Definition einer Copula

```

# Benötigte Bibliotheken
library(copula)
library(lmomco)

# Daten
data <- data.frame(
  # Vektor mit Jahreshöchstwerten des Abflusses
  qmax = c(179, 137, 125, 218, 452, 400, 430, 227, 167, 201, 230, 266,
           114, 153, 619, 558, 206, 297, 170, 582, 187, 134, 249, 235,
           356, 253, 708, 265, 345, 269, 554, 193, 456, 241, 536, 110,
           200, 260, 222, 237, 250, 442, 310, 120, 266, 314, 288, 180,
           918, 323, 337, 532, 344, 174, 1030, 360, 250, 295, 291, 560,
           423, 351, 674, 426, 163, 239, 357, 122, 426, 437, 543),
  # Vektor mit zu den Jahreshöchstwerten korrespondierenden Füllen über 50 m³/s
  vmax = c( 5.9, 4.4, 2.3, 18.4, 23.7, 46.2, 24.8, 8.0, 4.4, 4.0,
           14.4, 11.8, 1.2, 3.4, 67.8, 53.7, 10.7, 21.9, 6.8, 73.2,
           4.3, 1.9, 7.6, 34.7, 43.9, 23.0, 49.7, 8.9, 15.8, 14.0,
           77.6, 4.9, 31.3, 9.3, 45.9, 1.2, 8.1, 5.8, 8.5, 7.1,
           12.3, 24.2, 21.6, 2.3, 19.9, 16.6, 21.0, 6.2, 123.1, 16.3,
           25.0, 31.9, 18.2, 6.8, 95.2, 17.6, 10.7, 13.3, 10.8, 35.2,
           19.5, 10.9, 80.7, 30.0, 13.1, 11.8, 23.1, 2.2, 40.4, 29.5,
           40.9)
)

# Berechne Gütemaße
# Langsam! - ggf. Zahl der Iterationen vermindern
# Sn
gofCopula(gumbelCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")
gofCopula(francCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")
gofCopula(claytonCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Sn", estim.method = "itau")

# Rn
gofCopula(gumbelCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")
gofCopula(francCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")
gofCopula(claytonCopula(), as.matrix(data), N = 10000,
          method = "Rn", estim.method = "itau", simulation = "mult")

# Definiere Copula
# Berechne empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (pseudo observations)
data_pobs <- pobs(data)

# Ermittlung des Copulaparameters
# Copulaformulierung: Gumbel-Copula
# Schätzmethode: Inversion von Kendall's tau
fitted_copula <- gumbelCopula(param = coefficients(
  fitCopula(
    gumbelCopula(dim = 2),
    data_pobs,
    method = "itau")
  ),
  dim = 2)

```

R-Codebeispiel für Berechnung der Gütemaße Sn und Rn und die Definition einer an die Beispieldaten angepassten Gumbel-Copula.
 R code for calculating the GOF-measures SN and RN and definition of a Gumbel copula based on the example data set.

Anhang 4 - Codebeispiel für die Erstellung eines Kendall-Plots

```

# Dies ist eine Fortsetzung des Codebeispiels aus Tabelle 3.
# Zum Ausführen muss der folgende Code unter dem Code aus Tabelle 3 ergänzt werden.

# Kendall-Plot
# Die nachfolgende Berechnung von K0, H und W basiert auf der Funktion K.plot()
# aus dem R-Paket lcopula (Belzile 2022)
# Die Funktion wurde ursprünglich erstellt auf Basis von Code von C. Genest.

# Funktion zur Berechnung von K0 aus Genest & Favre (2007)
K0_fun <- function(w, i, n) {
  K0 <- w - w * log(w)
  -log(w) * w * K0^(i - 1) * (1 - K0)^(n - i)
}
# Funktion zur Berechnung der Empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Copula
# Fisher & Switzer 1985, 2001, Genest & Favre 2007
H_fun <- function(data) {
  n <- dim(data)[1]
  d <- dim(data)[2]
  out <- rep(NA, n)
  tmp <- paste("data[,", 1:d, "] <= data[i,", 1:d, "]")
  cmdnd <- parse(text = paste(tmp, collapse = " & "))
  for (i in 1:n) {
    subbb <- sum(eval(cmdnd)) - 1
    out[i] <- subbb/(n - 1)
  }
  out
}

# Berechnung
n <- length(data$max) # Zahl der Beobachtungen

# K0
w <- seq(0.01, 1, 0.01)
K_null <- w - w*log(w)

# Erwartungswert der i-ten Ordnungsstatistik unter der Annahme von
# Unabhängigkeit zwischen den Beobachtungen
W <- sapply(1:n, FUN = function(i) {
  factorial(n) / (factorial(i - 1) * factorial(n - i)) *
  integrate(K0_fun, lower = 0, upper = 1, i = i, n = n,
    subdivisions = 10000, rel.tol = .Machine$double.eps^0.001)$value
})
# Sortierte Hi der Beobachtungen
H <- sort(H_fun(data))
# Ziehe 1.000mal n zufällige Datenpaare aus der angepasste Gumbel-Copula
# und berechne für jede Ziehung H.
H_syn <- matrix(nrow = n, ncol = 1000)
for (i in 1:1000) {
  syn <- rCopula(n, fitted_copula)
  H_syn[, i] <- sort(H_fun(syn))
}
# Berechne Erwartungswert der H-Werte
H_sim_mean <- apply(H_syn, 1, FUN = mean)

# Plotting
plot(x = 1, y = 1, type = "n",
  xlab = "Wi:n", ylab = "Hi", xlim = c(0, 1), ylim = c(0, 1))
abline(h = 0, lty = 2)
abline(0, 1, lty = 2)
lines(w, K_null, lty = 2)
# Die Linie zeigt den Erwartungswert der auf Basis der angepassten Copula ermittelten
H-Werte.
lines(W, H_sim_mean, col = "steelblue4", lwd = 2, lty = 1)
points(W, H, pch = 19)
legend("bottomright", legend = c("H_i (Fisher & Switzer)", "angepasste Gumbel-Copula"),
  lty = c(0, 1), lwd = c(NA, 2), pch = c(19, NA), col = c("black", "steelblue4"))

```

R-Codebeispiel für die Erstellung eines Kendall-Plots.
R code for creating a Kendall plot.

Anhang 5 - Codebeispiel für die Erstellung eines Scatterplots auf Basis einer Copula

```

# Dies ist eine Fortsetzung des Codebeispiels aus Tabelle 3.
# Zum Ausführen muss der folgende Code unter dem Code aus Tabelle 3 ergänzt werden.

# Umrechnung in den realen Datenraum über Randverteilungen
# Parameter der GEV für die Randverteilung Q wurden in Tabelle 1 ermittelt
q_parameters <- c(311.8, 113.2, -0.098)
# Parameter der GEV für die Randverteilung V wurden in Tabelle 2 ermittelt
v_parameters <- c(12.69335, 15.17806, -0.1)

# Ziehe synthetische Datenpaare aus der angepassten Gumbel-Copula
syn <- rCopula(100000, fitted_copula)

# Umrechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Abflüsse
Q_syn <- quagev(syn[, 1], vec2par(q_parameters, type = "gev"))

# Umrechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Füllen
V_syn <- quagev(syn[, 2], vec2par(v_parameters, type = "gev"))

# Scatterplot
plot(Q_syn, V_syn,
      xlim = c(0, 2100), ylim = c(0, 250),
      xlab = "Q [m3/s]", ylab = "V über 50 m³/s [Mio. m3]",
      pch = 19, col = "gray")

# Erstelle 2D-Grid aus Wahrscheinlichkeitssequenzen
F_Q <- c(seq(0.05, 0.89, 0.01), seq(0.9, 0.99999, length.out = 5000))
F_V <- c(seq(0.05, 0.89, 0.01), seq(0.9, 0.99999, length.out = 5000))
pair_F_seq_xy <- cbind(expand.grid(F_Q, F_V)$Var1,
                      expand.grid(F_Q, F_V)$Var2)

# Werte für Kontourlinien
Q_seq <- quagev(F_Q, vec2par(q_parameters, type = "gev"))
V_seq <- quagev(F_V, vec2par(v_parameters, type = "gev"))

# Berechne Copula-Wahrscheinlichkeiten für 2D-Grid
seq_xy <- pCopula(pair_F_seq_xy, fitted_copula)

# Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens (UND-Fall)
seq_Cop_xy <- matrix(1 - pair_F_seq_xy[, 1] - pair_F_seq_xy[, 2] + seq_xy,
                    length(F_Q), length(F_V))

# Zeichne Kontourlinien
# (Es kann je nach Rechner etwas dauern, bis die Linien sichtbar sind)
contour(x = Q_seq,
        y = V_seq,
        z = seq_Cop_xy,
        levels = 1/ c(50, 100, 500, 1000, 5000, 10000),
        labels = c("50", "100", "500", "1.000", "5.000", "10.000"),
        add = TRUE,
        col = "blue",
        labcex = 1.2)

# Plot Beobachtungen
points(data$qmax, data$vmax, pch = 20, col = "deeppink")

```

R-Codebeispiel für die Erstellung eines Scatterplots auf Basis der angepassten Gumbel-Copula mit Wahrscheinlichkeitsisolines und Beobachtungsdaten.
 R code for creation of a scatterplot based on the fitted Gumbel copula including probability isolines and example data.

Aktuelles

6. Umweltversammlung der Vereinten Nationen beschließt besseren Schutz der globalen Wasserressourcen

Die sechste Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA-6) hat entscheidende Fortschritte beim Schutz der globalen Wasserressourcen beschlossen. Die UN-Mitgliedsstaaten werden in einer Resolution dazu aufgerufen, ihre Wasserressourcen zu schützen, nachhaltig zu bewirtschaften und durch ein besseres Monitoring genauer zu erfassen. Außerdem beschloss die UNEA-6 ein besseres Management gefährlicher Chemikalien und Chemikalienabfälle. Das globale Rahmenwerk für Chemikalien, das im Jahr 2023 unter deutscher Präsidentschaft in Bonn verabschiedet wurde, wird im Arbeitsprogramm des UN-Umweltprogramms (UNEP) verankert – und damit international gestärkt. Die UNEA-6 ist das höchste Entscheidungsgremium der Welt für Umweltangelegenheiten. Mehr als 140 Umweltminister und Vizeminister sowie rd. 6.000 Delegierte erarbeiteten auf der in Nairobi ausgetragenen Sitzung Lösungen für globale Umweltfragen.

Bei der UNEA-6 wurden über 20 Resolutionen zu verschiedenen Themen verhandelt. In der Wasser-Resolution werden die UN-Mitgliedsstaaten dazu aufgerufen, durch nationale Programme ihr Wassermanagement zu verbessern. Dies gilt zum Beispiel für die Landwirtschaft oder für wasserintensive Industrien. Von der Quelle bis zum Meer sollen kohärente Konzepte entwickelt werden, um Süßwasser, Küstengewässer und Meere besser zu schützen.

Die UNEA-6 hat ferner in einer Resolution das "globale Rahmenwerk für Chemikalien" (Global Framework on Chemicals – for a planet free of harm from chemicals and waste, GFC) förmlich anerkannt. Das GFC war im September 2023 auf der 5. Weltchemikalienkonferenz in Bonn unter deutschem Vorsitz beschlossen worden. Ziel des GFC ist es, den Umgang mit Chemikalien und Abfällen weltweit sicherer zu machen. Die gefährlichsten Chemikalien sollen möglichst aus dem Verkehr gezogen und Alternativen gefunden werden. Mit der Resolution soll die internationale Implementierung des GFC im Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) verankert – und damit international gestärkt werden. Zu Inhalt und Implementierungsbedarf des Rahmenwerks hat das Bundesumweltministerium bei der UNEA-6 erfolgreich ein offizielles "Side Event" veranstaltet, an dem die Ministerin und Akteure aus vielen Sektoren teilgenommen haben.

Weiter wichtig war bei der diesjährigen UNEA: Mit dem in Montreal beschlossenen globalen Biodiversitätsrahmen sowie dem UN-Hochseeschutzabkommen sind in den vergangenen zwei Jahren historische Meilensteine im Bereich Biodiversitäts- und Meeresschutz gelungen. Jetzt ging es darum, durch die UNEA-6 weiteren Rückenwind für die Umsetzung dieser wichtigen Beschlüsse zu erzeugen und hier eine aktive Rolle von UNEP und den regionalen Meereskonventionen zu definieren. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) hat sich erfolgreich dafür eingesetzt, dass die Ozeanresolution einen weiteren Beitrag für den stärkeren Schutz der Meere leistet.

Der UNEA-6 gehören insgesamt 193 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen an. Die UNEA setzt Prioritäten für die globale Umweltpolitik und das internationale Umweltrecht. Sie fördert Partnerschaften, um Umweltziele zu erreichen. Das Motto der diesjährigen Sitzung lautete: "Effective, inclusive and sustainable multilateral actions to tackle climate change, biodiversity loss and pollution". Die Präsidentschaft der diesjährigen UNEA-6 hatte Marokko inne. Zum ersten Mal leitete damit eine Präsidentschaft aus einem Land vom afrikanischen Kontinent die Verhandlungen. Nairobi ist der Hauptsitz des UNO-Umweltprogramms (UN Environment Programme/UNEP).

Weitere Informationen:

Konferenz-Webseite der 6. Umweltversammlung der Vereinten Nationen
<https://www.unep.org/environmentassembly/unea6>

Portal "Internationales", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
<https://www.bmu.de/themen/internationales/ueberblick-internationales>

(aus: Pressemitteilung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz vom 1. März 2024)

Internationaler Meeresschutz

Vertreter des Bundesumweltministeriums haben anlässlich der "Our Ocean Conference" in Athen zu einer zügigen Ratifizierung des UN-Hochseeschutzabkommens aufgerufen. An der "Our Ocean Conference" am 16. und 17. April 2024 nahmen zahlreiche Staats- und Regierungschefs sowie Ministerinnen und Minister teil, um konkrete Selbstverpflichtungen für den Schutz der Meere vorzustellen. Deutschland hat dieses Jahr zehn Einzel-Projekte ("Commitments") mit einer Gesamtsumme von fast 500 Mio. € eingereicht, wovon der größte Teil aus den Versteigerungen von Lizenzen für Offshore-Windparks in den deutschen Meeresgewässern stammt.

Die diesjährige Konferenz ist die erste "Our Ocean Conference", die nach der im vergangenen Jahr erfolgten Einigung der internationalen Staatengemeinschaft auf das UN-Hochseeschutzabkommen (oder BBNJ-Übereinkommen – für Biodiversity Beyond National Jurisdiction) stattfindet. Die "Our Ocean Conference" ist daher auch ein Forum, um die Umsetzung des Übereinkommens zu diskutieren. Das BBNJ-Übereinkommen kann in Kraft treten, sobald es von 60 Staaten ratifiziert ist. Es deckt die Gebiete ab, die außerhalb nationaler Hoheitsgewalt liegen – etwa 40 % der Erdoberfläche. Hier können unter dem BBNJ-Übereinkommen Schutzgebiete eingerichtet werden, die eine Erholung der Tiere und Pflanzen des Ozeans ermöglichen. Deutschland strebt die Ratifizierung bis Mitte des Jahre 2025 an und wird die Umsetzung des Abkommens im Rahmen der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) auch finanziell unterstützen.

Neben dem Thema Meeresschutzgebiete sind weitere Schwerpunktthemen der diesjährigen "Our Ocean Conference" die naturverträgliche Nutzung der Meere, die Reduzierung von Mee-

resmüll und die nachhaltige Fischerei. Bundesumweltministerin Steffi Lemke wird im offiziellen Programm der Konferenz u. a. zu letzterem Thema sprechen.

Um dringend notwendige Meeresnaturschutzmaßnahmen für den Erhalt und die Wiederherstellung bedrohter Arten und Lebensräume im Meer umzusetzen, investiert die Bundesregierung finanzielle Mittel, die aus der Versteigerung von Lizenzen für Offshore-Windparks in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone erzielt wurden. Diese sogenannte "Meeresnaturschutzkomponente" aus dem Windenergie Auf See Gesetz mit über 420 Mio. € ist Teil der im Rahmen der "Our Ocean Conference" eingereichten diesjährigen "Commitments" Deutschlands für den Meeresschutz.

Weitere Selbstverpflichtungen umfassen wichtige Meeresnaturschutzprojekte, mit denen beispielsweise auch mittel- und langfristige Auswirkungen der Klimakrise auf die Nord- und Ostsee untersucht und natürliche Klimasenken wie Seegraswiesen wiederhergestellt werden sollen. International unterstützt Deutschland u.a. den Erhalt der sogenannten "Blue Five" in der Südost-Pazifik-Region: das Projekt hat den Fokus, Wale, Delfine, Haie, Mantarochen und Meeresschildkröten zu schützen.

Die OOC-Konferenzreihe wurde vom damaligen US-Außenminister John Kerry im Jahr 2014 initiiert und seitdem nahezu jährlich von wechselnden Gastgebern und mit steigender Teilnehmerzahl durchgeführt. Die Teilnehmenden der OOC sind Staatenvertreter, Vertretende regionaler/internationaler Organisationen und Kooperationen, der internationalen Wirtschaft, sowie gesellschaftlicher Gruppen einschließlich der internationalen NGO-Szene. An der diesjährigen Konferenz nehmen Delegationen aus rund 115 Staaten teil.

Weitere Informationen:

Portal Meeresschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
<https://www.bmu.de/themen/meeresschutz/ueberblick-meeresschutz>

(aus: Pressemitteilung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz vom April 2024)

Jahresbilanz 2023 des Gesamtwasserspeichers in Deutschland liegt vor

Am 22. März ist der Welttag des Wassers. Vermeintlich allgegenwärtig, ist Wasser längst in weiten Teilen der Welt zur kostbaren und knappen Ressource geworden. Der Klimawandel hat die Situation vielerorts verschärft. Auch Deutschland hat in den vergangenen 5 Jahren drastische Dürren erlebt. Für das Jahr 2023 haben die Forschenden vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ den soeben komplettierten aktuellsten Datensatz des Satellitenduos GRACE-Follow-On ausgewertet, der auf Basis von Schwerefeldmessungen genaue Einblicke in die Wasserbilanz der Erde ermöglicht. Sie zeigen, dass sich der Gesamtwasserspeicher in Deutschland im Jahr 2023 zwar etwas erholt hat, dass im Vergleich zum langjährigen Mittel aber immer noch rd. 10 Mrd. t fehlen. Zum Vergleich: Der Bodensee fasst in etwa 48 Mrd. t Wasser. Für Europa ist seit Beginn der Messungen im Jahr 2002

ein Rückgang des Gesamtwasserspeichers um rund 100 Mrd. t zu verzeichnen. Daraus lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt allerdings noch kein eindeutiger Trend ableiten.

Der sogenannte terrestrische Gesamtwasserspeicher TWS (von engl. Terrestrial Water Storage) setzt sich zusammen aus den Wasserkreislaufkomponenten Eis, also Gletscher, Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser sowie dem Oberflächenwasser in Flüssen, Seen und künstlichen Reservoirs. TWS ist eine wichtige Messgröße für die Umwelt- und Klimaforschung. Sie gehört mittlerweile offiziell zu den 54 "Essenziellen Klimavariablen", die entscheidend zur Charakterisierung des Erdklimas beitragen und wichtige Basis für die Arbeit des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sind. Der TWS wird von der deutsch-amerikanischen GRACE-FO-Mission zur Verfügung gestellt.

Damit liefern die Schwerefeldmissionen nicht nur wertvolle Daten zum Wasser auf und unter der Erdoberfläche, sondern auch zur Massenbilanz der großen Inlandeischilder über Grönland und der Antarktis. Der Trend ist hier dramatisch: Jahr für Jahr verliert Grönland rd. 224 Mrd. t an Eis und die Antarktis, die ungleich kälter ist, 138 Mrd. t.

Diese und weitere aktuelle sowie hintergründige Informationen zu den GRACE-Satellitenmissionen, ihrem Messprinzip und der Datenauswertung, aber auch zu Forschungsprojekten sowie Animationen und Karten sind in dem neuen Informationsportal globalwaterstorage.info, das das GFZ eingerichtet hat, zu sehen. Faktenblätter und Themendossiers ergänzen das Angebot, das sich insbesondere an Vertreter der nationalen Medien und politische Entscheidungsträger, aber auch an die breite interessierte Öffentlichkeit richtet.

Seit dem Jahr 2002 liefern die Tandem-Satelliten der GRACE- bzw. seit dem Jahr 2018 der nachfolgenden GRACE-FO-Mission wichtige Daten für die Klimabeobachtung: GRACE steht für Gravity Recovery and Climate Experiment, übersetzt: Schwerkräftermittlungs- und Klimaexperiment. Sie ist eine gemeinsame Mission der NASA, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) mit weiteren Forschungs- und Industriepartnern. Die Satelliten ermöglichen die kontinuierliche Überwachung des Schwerefelds der Erde. Auf Basis von dessen winzigen Änderungen können zeitliche und räumliche Veränderungen im globalen Wasser- und Eishaushalt ermittelt werden – und damit auch der Einfluss, den der Klimawandel darauf hat.

Die an den GRACE-Missionen beteiligten Forschungseinrichtungen in den USA und Deutschland, die Industriepartner sowie die Bundesministerien für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und für Bildung und Forschung (BMBF) haben sich geeinigt, die Mission fortzusetzen: Voraussichtlich 2028 wird GRACE-C starten und auch weiterhin das Schwerefeld der Erde vermessen. Damit ist sichergestellt, dass die Vermessung des Wasserkreislaufs der Erde über eine Zeitspanne von wenigstens rd. 30 Jahren erfolgen kann – ein Zeitraum, der als Klimaperiode gilt.

Weitere Informationen:

Neues Infoportal des GFZ
<https://www.globalwaterstorage.info>

Sektion Erdsystemmodellierung,
Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
<https://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdsystem-modellierung/ueberblick/>

(aus: Pressemitteilung Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
vom 22. März 2024)

Neue Methoden für das Biodiversitätsmonitoring in Europas Flüssen

Neue Methoden für das Biodiversitätsmonitoring sind die Voraussetzung, um Veränderungen frühzeitig zu erkennen und dadurch die Natur effektiver zu schützen. Dies betrifft insbesondere Flussökosysteme. Das Forschungsprojekt "DNAqualMG: Innovatives transnationales aquatisches Biodiversitätsmonitoring" ermöglicht mit genetischen Hochdurchsatz-Analysen und automatischer Bilderkennung eine bessere Überwachung der biologischen Vielfalt in den Flüssen. Das inter- und transdisziplinäre Projekt der Arbeitsgruppe der Universität Duisburg-Essen trägt zum besseren Verständnis des Biodiversitätswandels in Europa bei und setzt mit seiner internationalen Strahlkraft neue Impulse.

Der Biodiversitätswandel in Europa wird zunehmend spürbarer. Vor diesem Hintergrund eröffnet das Forschungsprojekt "DNAqualMG: Innovatives transnationales aquatisches Biodiversitätsmonitoring" eine neue Perspektive: das inter- und transdisziplinäre Projekt hat das Ziel, den tiefgreifenden Biodiversitätswandel in Europa in seiner Komplexität besser zu verstehen und systematischer zu überwachen. Das Wissenschaftlerteam der Universität Duisburg-Essen (UDE) wird in dem internationalen Konsortium mit 14 Partnern aus elf europäischen Ländern die international führende Expertise für die Entwicklung und Einführung von molekularen Hochdurchsatz- und automatisierten Bilderkennungsmethoden zur Überwachung der biologischen Vielfalt in Europas Flüssen bündeln. Die Kombination der beiden sich ergänzenden Ansätze bietet Vorteile für die Bewertung der biologischen Vielfalt im Kontext der Verschlechterung und Wiederherstellung von Ökosystemen: Wie beim DNA-Fingerabdruck in der Forensik ermöglichen die genetischen Methoden eine genauere Erkennung und Beschreibung der Artenvielfalt, selbst bei mikroskopisch kleinen Lebewesen.

Diese Genauigkeit ist mit einer automatischen Bilderkennung oft nicht möglich, aber sie kann sehr zuverlässig Daten über die Häufigkeit, Größe und Biomasse von Arten liefern. In Kombination bieten diese komplementären Ansätze von DNA-Fingerabdruck und automatischer Bilderkennung die Möglichkeit, die Daten zur biologischen Vielfalt aus Umweltproben erheblich zu erweitern. Die Wissenschaftler des internationalen Forschungsprojekts planen, beide Ansätze weitgehend zu automatisieren und sogenannte "FAIR-Daten" zur biologischen Vielfalt zur Verfügung zu stellen, also auffindbare, zugängliche, interoperable und wiederverwendbare Daten.

Um die Möglichkeiten der neuen Methoden für ein europäisches Biodiversitätsmonitoring zu nutzen, werden die Wissenschaftler die Implementierung im Kontext des bestehenden und bewährten Monitorings von Gewässern im Rahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, auch EG-WRRL)

anstreben. Diese sieht ein routinemäßiges Biomonitoring zur Bewertung der Flüsse vor. Das Forschungsprojekt DNAqualMG hat das Ziel, mit den neuen Methoden umfassend zu untersuchen, wie Veränderung in den Artengemeinschaften mit der funktionalen Vielfalt und der ökologischen Zustandsklasse zusammenhängen. Dazu ist eine Bestimmung der Organismen bis auf das Artniveau erforderlich, um konkrete Hinweise für Biodiversitätsveränderungen zu erhalten. Allerdings erfolgt dieses Vorgehen bislang in nur wenigen Ländern. Das ermöglicht zwar ein Biomonitoring, das Einblick in den ökologischen Zustand einer Region gibt, aber für ein echtes Biodiversitätsmonitoring auf Artebene sind umfassende Daten wie aus diesem Projekt erforderlich.

Wirbellose Tiere und Kieselalgen sind die am häufigsten untersuchten Indikatorgruppen der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Davon werden die Wissenschaftler der Universität Duisburg-Essen gemeinsam mit Kolleginnen aus Behörden und Wasserverbänden in acht Ländern Proben nehmen und prüfen, wie sich die neuen Methoden in den Routinebetrieb integrieren lassen und den wissenschaftlichen Mehrwert der neuen Daten für ein europäisches Biodiversitätsmonitoring aufzeigen.

Das Forschungsprojekt fokussiert darauf, auf diese Weise neue Ziele für Indikatoren der biologischen Vielfalt zu identifizieren. Auf der Grundlage der Projektergebnisse planen die Wissenschaftler, eine Strategie für eine verbesserte länderübergreifende Überwachung der biologischen Vielfalt und des Wandels von Ökosystemen zu entwickeln und damit die Umsetzung des Europäischen Green Deals, insbesondere der Europäischen Biodiversitätsstrategie, sowie des Globalen Biodiversitätsrahmens von Kunming-Montreal zu unterstützen.

Das Projekt hat insgesamt ein Finanzvolumen von rd. 2,0 Mio. € und umfasst Partnerinstitutionen aus 11 Ländern.

Weitere Informationen:

Projekt-Homepage
<https://dnaqualimg.eu>

Aquatische Ökosystemforschung, Universität Duisburg-Essen
https://www.uni-due.de/aquatische_oekosystemforschung/

(aus: Pressemitteilung Universität Duisburg-Essen
vom 1. März 2024)

Citizen Science-Projekt FLOW – Kleine Bäche in Deutschland sind in einem schlechten ökologischen Zustand

Pflanzenschutzmittel sichern Erträge in der Landwirtschaft, indem sie unerwünschte Pilze und Unkräuter bekämpfen. Sie gelangen aber auch in benachbarte Bäche und schädigen dort Lebensgemeinschaften, die für den Erhalt der Artenvielfalt entscheidend sind, Teil des Nahrungsnetzes sind und die Selbstreinigung des Wassers unterstützen. Vor allem für kleine Fließgewässer fehlen jedoch bislang belastbare Daten, die Auskunft darüber geben, wie es um sie wirklich bestellt ist.

Im Citizen Science-Projekt FLOW haben 900 Bürgerforschende über drei Jahre lang in ganz Deutschland kleine Fließgewässer

auf ihren ökologischen Zustand untersucht. Das Projekt wurde vom Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und dem Deutschen Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig durchgeführt. Die Daten zeigen: In der Mehrheit der untersuchten Bäche, die durch eine landwirtschaftlich geprägte Landschaft fließen, ist die Wirbellosenfauna durch Pflanzenschutzmittel gestört, zudem weisen die Fließgewässer eine stark veränderte morphologische Struktur auf. Das Projekt bestätigt darüber hinaus, dass Bürgerforschung auch im Bereich der Gewässerökologie dringend benötigte Daten in hoher Qualität liefern kann. Auf Flüsse als wertvolle Lebensräume will auch der "Internationale Tag der Flüsse" am 14. März 2024 aufmerksam machen und ruft zu deren Schutz auf.

Trotz zahlreicher Maßnahmen, die seit dem Jahr 2000 ergriffen wurden, um die Ziele der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) zu erfüllen, sind laut Umweltbundesamt nach wie vor etwa 90 % der amtlich untersuchten deutschen Fließgewässer in keinem "guten ökologischen Zustand". Dabei finden die vielen kleinen Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet von unter zehn Quadratkilometern bei der systematischen Überwachung der Behörden bislang kaum Beachtung. Und das, obwohl sie etwa 70 % des deutschen Gewässernetzes ausmachen und somit für den Erhalt der biologischen Vielfalt von großer Bedeutung sind.

Um einen Überblick über die Belastung von Kleinfließgewässern mit Pflanzenschutzmitteln zu bekommen, hatte das Forschungsteam des UFZ im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) im "Pilotprojekt Kleingewässermonitoring" zwischen den Jahren 2019 und 2022 über 100 kleine Bäche in landwirtschaftlichen Gebieten untersucht. Dabei wurde deutlich, dass in 80 % dieser Bäche die staatlichen Pestizid-Grenzwerte, die nach Einschätzung von Wissenschaftler noch viel zu hoch angesetzt sind, überschritten werden.

Um die Datenlage weiter zu verbessern, startete im Jahr 2021 das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt FLOW – ein Citizen Science-Projekt, in dem Bürgerforschende Daten für die Wissenschaft sammeln. Seit drei Jahren in Folge sind geschulte Freiwilligengruppen unterwegs, um die Bäche in ihrer Region zu erforschen. Das Wissenschaftlerteam konnte mit mehr als 900 Freiwilligen in etwa 90 regionalen Gruppen im Zeitraum 2021 bis 2023 insgesamt 137 Bäche untersuchen. Etwa 83 % der Probenahmestellen lagen in landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten.

Die Freiwilligen bewerteten die Gewässerstruktur, maßen die chemische Wasserqualität und untersuchten die wirbellosen Tiere des Gewässergrunds, das sogenannte Makrozoobenthos. Durch die Bestimmung der Makrozoobenthos-Gemeinschaft zogen sie mithilfe des am UFZ entwickelten Bioindikators "SPEARpesticides" Rückschlüsse auf die Pestizidbelastung des Gewässers.

Die Auswertung des Citizen Science-Daten bekräftigt die Ergebnisse des UFZ-Kleingewässermonitorings: Die Wirbellosenfauna ist in rd. 60 % der beprobten Bäche in landwirtschaftlichen Einzugsgebieten durch Belastungen mit Pflanzenschutzmitteln gestört. Diese Probenahmestellen wurden mit den SPEARpesticides-Indikator-Klassen "mäßig", "unbefriedigend" oder "schlecht" bewertet. Hierbei zeigte sich, dass der Zustand

der aquatischen Lebensgemeinschaften tendenziell schlechter ausfiel, je stärker das Einzugsgebiet der Probenahmestellen durch Ackerbau geprägt war.

Zusätzlich zur Belastung mit Pflanzenschutzmitteln wurde deutlich, dass in über 60 % der untersuchten Bäche auch die Gewässerstruktur deutlich bis stark verändert ist – etwa durch verbaute Uferstrukturen, fehlende Ufervegetation oder eine verarmte Gewässersohle. Auch das beeinträchtigt die Lebensraumqualität und die Ökosystemfunktionen dieser Bäche stark.

Es besteht also dringender Handlungsbedarf, die chemische Belastung und die Verbauung der kleinen Fließgewässer zu reduzieren, will man deren ökologischen Zustand, wie in der EG-WRRL gefordert, verbessern.

Die Ergebnisse des Citizen Science-Projekts FLOW verdeutlichen aber auch den Wert von Bürgerforschung: Durch das Citizen Science-Projekt wurde gemeinsam das noch benötigte Wissen zum Zustand der Fließgewässer festgestellt. Die Auswertungen zeigten, dass die FLOW-Bürgerforschenden valide Daten zum Gewässerzustand erheben, die in hohem Maße mit professionell erhobenen Daten der Wissenschaftler übereinstimmen.

Das Citizen Science-Projekt FLOW wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderbereichs Bürgerforschung gefördert. Eine begleitende Dissertation wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt.

Fachartikel:

von Gönner, J., Gröning, J., Grescho, V., Neuer, L., Gottfried, B., Hänsch, V.G., Molsberger-Lange, E., Wilharm, E., Liess, M., Bonn, A. (2024): Citizen science shows that small agricultural streams in Germany are in a poor ecological status. *Science of The Total Environment*, 171183.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171183

Weitere Informationen:

Projektwebseite "Citizens Science-Projekt FLOW"
<https://www.flow-projekt.de/>

Department Biodiversität und Mensch,
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<https://www.ufz.de/index.php?de=34228>

Department Ökotoxikologie,
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<https://www.ufz.de/index.php?de=34241>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH vom 14. März 2024)

Exzellenzprojekt REASONS zur Untersuchung der Flussökosysteme im Anthropozän

Steigende Temperaturen, Antibiotikarückstände, Dürren und Hochwasser: Flüsse geraten weltweit unter Druck. Um sie wieder in einen naturbelassenen Zustand zu überführen, entwickeln Forscher der Exzellenzclusterinitiative REASONS ein neues, nachhaltiges Konzept für das Management von Gewässern. Das inter-

disziplinäre Forschungsteam wird geleitet von der Universität Duisburg-Essen und der Ruhr-Universität Bochum.

Mit neuen Mess- und Analysemethoden erforschen die Wasserexperten und -expertinnen die Basis für ein zukunftsfähiges Flussmanagement, das Stressoren wie Klimawandel, stoffliche Belastungen sowie Veränderungen in der Biodiversität integriert. Das Besondere: der Ansatz stellt das sich wandelnde System in den Mittelpunkt und findet einen innovativen Umgang mit den teils irreversiblen Veränderungen von Binnengewässern.

Die Universität Duisburg-Essen hat einen deutschlandweiten Schwerpunkt im Bereich der Wasserforschung. Forschende aus den Disziplinen Biologie, Chemie, Medizin, Ingenieurwissenschaften sowie Geistes- und Gesellschaftswissenschaften haben in den letzten beiden Jahrzehnten eine exzellente inter- und transdisziplinäre Zusammenarbeit entwickelt. Besondere Studiengänge und die "Water Graduate School für Early Career Researchers" bilden darüber hinaus hervorragende Strukturen für Spitzenforscher und Spitzenforscherinnen in frühen Karriere-stadien.

Das Exzellenzprojekt REASONS ist aus dem etablierten Netzwerk des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung an der Universität Duisburg-Essen mit Partnern der Ruhr-Universität Bochum, der Goethe Universität Frankfurt, der Philipps-Universität Marburg, des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung, des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei sowie der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung entstanden.

Weitere Informationen:

Projekt-Homepage Exzellenzprojekt REASONS
<https://www.uni-due.de/zmb/reasons.php>

(aus: Pressemitteilung Universität Duisburg-Essen vom 2. März 2024)

Genauere Ergebnisse durch kombinierte Modellierung von Wasserhaushalt und Stoffeinträgen

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und das Umweltbundesamt (UBA) haben zwei ihrer Modellsysteme – das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME und das Stoffeintragsmodell MoRE – gekoppelt. Der kürzlich veröffentlichte Abschlussbericht zum neuen Modellverbund zeigt: Die Stoffeinträge in den Gewässern können durch die Zusammenführung der zwei Modelle genauer dargestellt werden. Die beiden Forschungseinrichtungen wollen mit der Zusammenarbeit ihre Verfahren des Monitorings der Wasserressourcen und der Stoffeintragsbilanzierung zukünftig besser aufeinander abstimmen.

In einem Forschungsvorhaben wurden in Kooperation zwischen dem Umweltbundesamt und der Bundesanstalt für Gewässerkunde die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME (Large Area Runoff Simulation Model) der BfG mit denen des UBA-Stoffeintragsmodell MoRE (Modeling of Regionalized Emissions) gekoppelt. Wasser ist die treibende Kraft beim Transport von Stoffen innerhalb der aquatischen Umwelt. Daher ist es

besonders wichtig, die einzelnen Eintragspfade in Abhängigkeit von den Abflusskomponenten abzubilden. Die bundesweite Stoffeintragsmodellierung von zum Beispiel Nährstoffen, Schwermetallen und Pflanzenschutzmitteln basiert somit fortan auf einer Wasserhaushaltsmodellierung auf Tagesbasis, welche die natürlichen Verhältnisse besser widerspiegelt und Wasserflüsse in unterschiedlichen Bodentiefen abbildet.

Plausible Wasser- und Stoffhaushaltssimulationen spielen unter anderem für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) eine große Rolle, zum Beispiel bei Daten, die im Rahmen von nationalen Berichtspflichten gegenüber der Europäischen Union erhoben werden. Darunter fallen unter anderem bundesweite Wasserhaushalts- und Stoffeintragsbilanzen. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME kommt bereits jetzt in der vom BMUV koordinierten Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Bundes zum Einsatz.

Ein bestimmender Faktor für die Simulation des Wasserhaushalts und der Stoffeinträge ist der voranschreitende Klimawandel. Trockenheit und Starkregen haben einen immer größer werdenden Einfluss auf Stoffeinträge in Gewässer und Böden. Niederschlag, Verdunstung, Versickerungs- und Abflussprozesse bestimmen in Abhängigkeit von der Vegetation und dem Boden, wo und wie extreme Trockenphasen oder Starkregenereignisse Stoffflüsse beeinflussen. Eine möglichst gute Beschreibung des aktuellen Wasserhaushalts und Szenarien seiner zukünftigen Entwicklung mithilfe von mathematischen Modellen ist daher dringend notwendig, um plausible Aussagen zu den resultierenden Stoffeinträgen vorzunehmen.

Mehr denn je sind daher Kooperationen wichtig, um das erforderliche Wissen und die Methoden zusammenzubringen. Das Umweltbundesamt und die Bundesanstalt für Gewässerkunde werden ihre fachliche Zusammenarbeit dahingehend vertiefen und den neuen Modellverbund gemeinsam weiterentwickeln.

Weitere Informationen:

Gemeinsamer Abschlussbericht zum Modellverbund LARSIM-ME/MoRE, Umweltbundesamt
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zusammenfuehrung-der-bundesweiten-modellierung-von>

(aus: Online-Nachricht Bundesanstalt für Gewässerkunde vom 15. März 2024)

Kartierung der chemischen Fußabdrücke in europäischen Flüssen

Gelangen Chemikalien aus häuslichen Quellen über Kläranlagen, aus der Landwirtschaft und aus der Industrie in die Gewässer, wirkt sich dieser Eintrag negativ auf die Süßwasserökosysteme aus. Um mehr über die Belastung europäischer Flüsse herauszufinden, hat ein Forschungsteam des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) rund 450 Proben aus 22 europäischen Fließgewässern ausgewertet und dabei mehr als 500 Chemikalien gefunden, zum Teil in hohen Konzentrationen. Diese stellen gemäß den Untersuchungen des Forscherteams insbesondere für wirbellose Tiere ein hohes Risiko dar.

Pflanzenschutzmittel, Industriechemikalien, Arzneimittel – die meisten von ihnen sowie deren Abbauprodukte finden sich nach dem Gebrauch irgendwann in Bächen und Flüssen wieder. Ein Team von Umweltchemiker des UFZ hat deshalb 610 Chemikalien, deren Vorkommen oder problematische Wirkung bekannt sind, genauer betrachtet und analysiert, ob und wenn ja, in welchen Konzentrationen sie in den Fließgewässern Europas vorkommen – angefangen von großen Flüssen wie Elbe, Donau, Rhein über Ebro und Tajo auf der iberischen Halbinsel bis hin zu kleineren Fließgewässern in landwirtschaftlich geprägten Regionen Deutschlands.

Das Ergebnis nach der Auswertung von 445 Proben aus insgesamt 22 Flüssen: Die Forschenden konnten insgesamt 504 der 610 Chemikalien nachweisen. Insgesamt fanden sie 229 Pestizide und Biozide, 175 pharmazeutische Chemikalien sowie Tenside, Kunststoff- und Gummizusätze, Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) und Korrosionsinhibitoren. In 40 % der Proben wiesen sie bis zu 50 chemische Substanzen nach, in weiteren 41 % zwischen 51 und 100 Chemikalien. In 4 Proben konnten sie sogar mehr als 200 organische Mikroschadstoffe belegen. Mit 241 Chemikalien stellten sie die meisten Substanzen in einer Wasserprobe der Donau fest.

Am häufigsten fanden die Umweltchemiker in den Proben N-Acetyl-4-aminoantipyrin. Der Stoff ist ein Abbauprodukt des Arzneimittelwirkstoffs Metamizol, der bei der Schmerzbehandlung in der Humanmedizin eingesetzt wird, über dessen Auswirkungen auf Süßwasserökosysteme aber bislang kaum etwas bekannt ist. Bei zahlreichen dieser Metabolite ist unklar, wie schädlich sie für die Umwelt sind. Bei anderen Substanzen, die die Wissenschaftler in den Gewässern entdeckten, sind die negativen Auswirkungen dagegen bereits erforscht. Einer der häufigsten dieser Stoffe ist Carbamazepin, ein Arzneistoff zur Behandlung von Epilepsie. In Gewässern ist er jedoch biologisch schwer abbaubar, beeinträchtigt die Fortpflanzungsfähigkeit wirbelloser Tiere und verzögert die Entwicklung von Fischen. Der Stoff steht deshalb bereits auf der Beobachtungsliste des Umweltbundesamts (UBA) und ist einer von 23 weiteren vorgeschlagenen prioritären Stoffen, um die die EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) erweitert werden soll. Auch die Wirkung einiger anderer Substanzen, die ebenfalls oft in den Proben festgestellt wurden, ist bekannt. Häufig fanden die UFZ-Forschenden zum Beispiel die Insektizide Diazinon und Fipronil, die beide sehr schädlich für wirbellose Wasserorganismen sind. Insgesamt wurden bei mehr als 70 Chemikalien in den Gewässern die chronischen Risikoschwellen für Wirbellose überschritten – das bedeutet, dass es bei anhaltender oder wiederholter Exposition etwa zu Entwicklungsstörungen kommen kann.

Viele der einzelnen organischen Mikroschadstoffe sind schon für sich gesehen ein Problem für Gewässer, allerdings kommt noch ein weiteres dazu. Schwierigkeiten bereitet die Bandbreite der Chemikalien, die in die Gewässer eingetragen werden. Denn man weiß noch viel zu wenig darüber, welche additiven Wirkungen diese Stoffe haben, wenn sie sich miteinander vermischen. Um die Wirkung dieser Mischungseffekte auf die in den Fließgewässern lebenden Organismen einschätzen zu können, nutzten die Forscher das Konzept des chemischen Fußabdrucks. Es ist ein quantitatives Maß für die Gefahr einer Beeinträchtigung der Wasserqualität – also konkret, welche Überlebenschance Wasserorganismen wie etwa Fische, Krustentierchen und Algen

an einem untersuchten Standort haben. Berechnet wird der chemische Fußabdruck, indem die Konzentration einer Chemikalie an einem Standort ins Verhältnis zum erwarteten Effekt gesetzt wird. Anschließend werden die Werte für die nachgewiesenen Chemikalien addiert. Für jede dieser Organismengruppen gibt es einen wissenschaftlichen Grenzwert, bei dessen Überschreitung mit dem Verschwinden empfindlicher Arten aus dem Ökosystem gerechnet werden muss. In 74 % der untersuchten Proben werden die wissenschaftlichen Grenzwerte überschritten. Besonders hoch ist das Risiko für Krebstierchen: An 15 % der untersuchten Standorte ist das Risiko für sie akut. Das heißt, dass für die Tiere die Überlebenschancen an diesen Standorten im Gewässer gering sind.

Die UFZ-Forscher folgern aus ihren Ergebnissen, dass in den europäischen Gewässern trotz vieler Verbesserungsmaßnahmen in der Vergangenheit immer noch zu viele Chemikalien vorkommen und an viele Standorten Grenzwerte überschritten werden. Die erhobenen Daten zeigten zudem, dass nicht nur einzelne Substanzen, sondern vor allem die Vielzahl der Substanzen zu diesem Problem beitragen. Notwendig sei deshalb zum einen, in der chemischen Gewässerüberwachung für die Umsetzung der EG-WRRL noch deutlich mehr Chemikalien aufzunehmen, weil diese bislang nicht in der Umwelt bewertet werden. Zum anderen brauche es mehr Messdaten. Oft ist völlig unklar, welche Effekte Chemikalien in welcher Konzentration auf Organismen in den Gewässern haben. In diesen Fällen wird bislang auf modellbasierte Werte zurückgegriffen, die eine größere Unsicherheit als die gemessenen Effekt-Werte mit sich führen. Und vor allem sollten bei der Bewertung von Chemikalien ihre Mischungen stärker in den Fokus genommen werden.

Die Proben wurden zwischen 2016 und 2019 während verschiedener Probenahmekampagnen wie zum Beispiel dem Deutschen Kleingewässermonitoring (KGM), dem Joint Danube Survey 4 (JDS4), einer Probenahmekampagne der Internationalen Kommission zum Schutz der Donau in Kooperation mit dem EU-Projekt SOLUTIONS, sowie einer Elbe-Beprobung gesammelt.

Fachartikel:

Finckh, S., Carmona, E., Borchardt, D., Büttner, O., Krauss, M., Schulze, T., Yang, S., Brack, W. (2024): Mapping chemical footprints of organic micropollutants in European streams. *Environment International*, January 2024.

DOI: 10.1016/j.envint.2023.108371

Weitere Informationen:

Department "Exposure Science",
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<https://www.ufz.de/index.php?de=34242>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 7. März 2024)

Modellsimulation zeigt Verbreitung und Verbleib von Phytoplankton im Elbe-Ästuar

Phytoplankton sind freischwebende, mikroskopisch kleine Organismen und Pflanzen, die sich nicht selbstständig fortbewegen können. Sie sind für das Ökosystem Ästuar – also Flussmündungen, die dem Wechselspiel von Ebbe und Flut ausgesetzt sind –

von wesentlicher Bedeutung, da sie als Nahrungsgrundlage für zahlreiche Lebewesen dienen.

Bislang ist wenig darüber bekannt, wie sich Phytoplankton im Ästuar halten kann, denn eigentlich sollte es sich mit der Strömung bewegen und in das Meer ausgewaschen werden. Wenn man davon ausgeht, dass eine Population nicht von einer stromaufwärts liegenden Population aufrechterhalten wird, dann muss es eine Art Rückhalte Mechanismus geben, der es den Organismen ermöglicht, im Ästuar zu überleben. In der Vergangenheit gab es verschiedene Theorien darüber, wie Phytoplankton-Populationen in Ästuaren ihre Position halten können, darunter vertikale Migration in Form von Absinken. Bislang ist nur wenig darüber bekannt.

Ein Wissenschaftlerteam der Universität Hamburg hat hierzu in einer Modellsimulation ein neues, auf Individuen basierendes Modell des Elbe-Ästuars vorgestellt, das mögliche Rückhalte Mechanismen für Phytoplankton untersucht. Die Simulationen zeigen, dass das Aufsteigen in der Wassersäule den Fortbestand begünstigt und dass Flussufer und Marschen für das Überleben von Phytoplankton-Populationen von wesentlicher Bedeutung sind. Grund dafür ist, dass Phytoplankton-Organismen mit starkem Auftrieb oder dem Potenzial, sich in der Wassersäule nach oben zu bewegen, eher in flache Gebiete in der Nähe der Flussufer oder der Marschen transportiert werden, die Zufluchtsorte vor starken Strömungen bieten.

Für die Untersuchung haben die Forschenden das Lagrangesche Modell "OceanTracker" auf das Elbeästuar angewandt. Während das Lagrangesche-Modell die Bewegung der unbelebten Partikel simulierte, haben die Wissenschaftler die wichtigsten biologischen Merkmale des Phytoplanktons, wie Vermehrung und Sterblichkeit, Absinken und Aufsteigen sowie die tägliche vertikale Wanderung hinzugefügt. Dadurch, dass in dem Modell einzelne Organismen simuliert wurden, konnten die Forschenden die Spuren der Individuen beobachten.

Die Ergebnisse legen nahe, wie wichtig die flachen Marschgebiete für die Ästuar-Ökosysteme sind. Und sie unterstreichen auch die Notwendigkeit eines ökosystembasierten Managements, um die Verschlechterung von Ästuar-Ökosystemen durch Baggerungen und Eindeichungen zu vermeiden.

Fachartikel:

Steidle, L., Vennell, R. (2024): Phytoplankton Retention Mechanisms in Estuaries: A Case Study of the Elbe Estuary. *EGUsphere*, Vol. 31, Issue 1, 151-164.

DOI: 10.5194/npg-31-151-2024

Weitere Informationen:

Fachbereich Biologie, Marine Ökosystemmodellierung,
Universität Hamburg
<https://www.biologie.uni-hamburg.de/>

*(aus: Pressemitteilung Universität Hamburg
vom 14. März 2024)*

Moore: Wiedervernässung & Bewirtschaftungsänderung wirken Klimawandel entgegen

Das Peatland Science Centre (PSC) der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) hat in einer experimentellen Feldstudie auf landwirtschaftlich genutztem Grünland auf organischen Böden die Auswirkungen der Wiedervernässung und der prognostizierten Klimaerwärmung auf Intensivgrünland und auf extensiv bewirtschaftetes Seggengrünland untersucht. Die Versuchsvarianten für die beiden Grünlandtypen waren entwässerte bzw. wiedervernässte Bedingungen, Umgebungsbedingungen bzw. Erwärmung sowie eine Kombination von Wiedervernässung und Erwärmung. Gemessen wurde der Netto-Ökosystemaustausch von CO₂, Methan und Lachgas sowie die Biomasseerträge.

Deutschland hat sich verpflichtet, bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, sind erhebliche Emissionsreduktionen in allen Sektoren erforderlich. Organische Böden sind derzeit die größte einzelne Emissionsquelle innerhalb der Sektoren Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF), daher sollte die Eindämmung der Emissionen aus Moorböden eine Priorität sein.

In Deutschland trugen die Emissionen aus entwässerten organischen Böden im Jahr 2021 mit ca. 53,7 Mio. t Kohlendioxid-Äquivalenten zu den gesamten nationalen Treibhausgas-Emissionen (THG) bei. Zusätzlich zu Renaturierungsmaßnahmen wird erwartet, dass eine Umstellung der Bewirtschaftungsmethoden, Wiedervernässung oder die Nutzung von Mooren für die Paludikultur die THG-Emissionen deutlich reduzieren. Die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Minderungsmaßnahmen müssen noch untersucht werden.

Ein Wissenschaftlerteam des PSC hat die Ergebnisse des ersten Jahres der Treibhausgasmessungen nach der Verpflanzung erwachsener Carex-Bodenmonolithen, einschließlich des kontrollierten Anstiegs von Wasserstand und Temperatur zusammengetragen. Bei allen Varianten wurden dabei höhere Lachgasemissionen als erwartet festgestellt. Dies war vor allem für die wiedervernässten Intensivwiesen und die Carex-Varianten unerwartet, aber größtenteils darauf zurückzuführen, dass der Beginn der Wiederbefeuchtung mit Frost-Tau-Zyklen zusammenfiel. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Gesamtergebnisse zu den Minderungs- und Anpassungstrends. Es stellte sich heraus, dass wärmere Bedingungen die gesamten Treibhausgasemissionen des entwässerten Intensivgrünlands um nahezu 40 % auf rd. 67 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Hektar und Jahr erhöhten. Die Umstellung der Grünlandbewirtschaftung auf die Seggen-Paludikultur führte zu der größten Treibhausgasreduzierung. Überraschenderweise stellte sich heraus, dass diese starke Senke auch unter den simulierten warmen Bedingungen aufrechterhalten werden. Das Emissionsreduktionspotenzial für die Seggen-Paludikultur betrug minus 80 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Hektar und Jahr.

Paludikulturen sind eine wichtige Minderungsmaßnahme, um die Klimaschutzziele erreichen zu können. Die Ergebnisse des Forscherteams legen nahe, dass diese auch eine höhere Resilienz im Klimawandel haben und daher besonders Moorböden schützen können.

Denn die PSC-Studie hat ergeben, dass das neuartige Konzept der Paludikultur das stärkste Emissionsminderungspotenzial aufweist. Die Ergebnisse liefern den ersten experimentellen In-situ-Feldnachweis, dass die beobachtete starke Senkenfunktion für Treibhausgase auch bei einer Erwärmung fortbestehen könnte. Dies zeigt das Potenzial der Paludikultur, die Auswirkungen der Erwärmung auf die Ökosystememissionen zu modifizieren und damit eine wichtige Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel auf organischen Böden zu liefern.

Um die Ergebnisse dieses einjährigen Experiments zu untermauern, sind jedoch mehrjährige Studien erforderlich. Die Ergebnisse unterstreichen auch die Notwendigkeit, entschlossen geeignete Anpassungsmaßnahmen zu ergreifen, denn es wurde auch festgestellt, dass ein Temperaturanstieg von nur 0,9 °C – ein moderates Erwärmungsszenario, das für die nähere Zukunft vorhergesagt wird – die Emissionen von entwässertem Grünland auf organischen Böden deutlich erhöht. Dieses Ergebnis stellt die Zuverlässigkeit der derzeitigen Emissionsfaktoren für die Schätzung der Treibhausgasemissionen in der nahen Zukunft weiter in Frage.

Studien über die angepasste Artenzusammensetzung von Intensivgrünland mit angepasster Düngung für den Nassanbau könnten Möglichkeiten zur Milderung der Folgen für organische Böden an Standorten bieten, an denen eine Extensivierung der Bewirtschaftung aufgrund der Anforderungen an die Biomassequalität nicht in Frage kommt (z. B. bei der Futtermittelproduktion für die Milchviehwirtschaft). Im Hinblick auf das Anpassungspotenzial und die Widerstandsfähigkeit sind zusätzliche Studien zur Bewertung der langfristigen Stabilität der Biomasseentwicklung in der Paludikultur und des Fortbestands der Treibhausgasenke von Bedeutung. Und schließlich kann die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Paludikulturarten zu robusten Emissionsfaktoren und zu einer fundierten Entscheidungsfindung für die Umsetzung von Paludikulturen in größerem Maßstab beitragen.

Fachartikel:

Bockermann, C., Eickenscheidt, T., Drösler, M. (2024): Adaptation of fen peatlands to climate change: rewetting and management shift can reduce greenhouse gas emissions and offset climate warming effects. *Biogeochemistry* (2024).
DOI: s10533-023-01113-z

Weitere Informationen:

Peatland Science Centre, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
<https://www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/institut-fuer-oekologie-und-landschaft/peatland-science-centre>

(aus: Pressemitteilung Hochschule Weihenstephan-Triesdorf vom 27. Februar 2024)

Neues Satellitenpaar zu Messungen der Masseveränderungen von Wasserkörpern

Der Mittelmeerraum Europas trocknet seit Jahren aus. In einigen Regionen Spaniens – wie in der Metropole Barcelona – herrscht bereits jetzt ein besorgniserregender Zustand, weil der Grundwasserspiegel teilweise um 3 m/Jahr fällt. Und auch auf dem gesamten Kontinent ist er seit dem Rekord-Dürrejahr 2018

konstant niedrig, auch wenn Extremwetterereignisse mit Überschwemmungen in jüngster Zeit einen anderen Eindruck vermitteln.

So hat Deutschland innerhalb der vergangenen 20 Jahre mehr als 15 Mrd. t Wasser verloren. Um solche Daten zu gewinnen und mit ihnen ein genaues Bild von den Grundwasserspiegeln wie auch des globalen Wasserhaushalts zu bekommen, ist eine Möglichkeit, hierzu aus dem All unter die Erdoberfläche zu "schauen". Hierbei helfen gemeinsam mit anderen Messmethoden seit über zwei Jahrzehnten die Daten eines ganz besonderen Satellitenpaares: Am 17. März 2002 starteten mit "Tom" und "Jerry" die ersten beiden Satelliten im "Gravity Recovery and Climate Experiment" – kurz GRACE-Mission – der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Fast genau 22 Jahre später haben die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR und die NASA mit GRACE-C diese sehr erfolgreiche Mission nach GRACE Follow-On (GRACE-FO) zum zweiten Mal verlängert. Das "C" steht dabei für "Continuity", womit die Konstanz in den Messreihen dieser Umweltmissionen gewürdigt wird. Von deutscher Seite als wissenschaftliche Beteiligte dabei sind das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam und das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut; AEI) in Hannover. Der Start für das neue Satellitenpaar von GRACE-C ist für das Jahr 2028 mit einer Falcon-9-Rakete des US-Raumfahrtunternehmens SpaceX vorgesehen. Im Anschluss soll das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum (GSOC) beim DLR in Oberpfaffenhofen die Missionskontrolle übernehmen.

Mit den GRACE-Satelliten erfassen Wissenschaftler seit mehr als 20 Jahren jede Veränderung von Wasser-Massentransporten global so präzise, dass Forschende zum Beispiel den Wasserhaushalt der Erde mit zuvor unerreichter Genauigkeit und Konstanz messen konnten. Die Mission GRACE-C wird diese wertvolle Datensammlung fortsetzen, die zu den Grundlagen für die Berichte des Weltklimarates gehört.

Bei GRACE-C wird die Entfernung mittels Laser-Interferometrie bestimmt. Ein wichtiger Teil dieses Laser Ranging Interferometer (LRI)-Systems ist die sogenannte "optische Bank" und der Retroreflektor. Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut; AEI) in Hannover unterstützen hierbei die Entwicklung und den Bau.

Die Idee hinter dem GRACE-Prinzip ist eigentlich ganz einfach: Das Satellitenpärchen erfasst die Massen alleine anhand ihrer Schwerkraftwirkung. Dafür fliegen die beiden Satelliten jeweils in einem mittleren Abstand von nur rd. 220 km hintereinander her. Relative Distanzabweichungen und Geschwindigkeit der beiden werden dabei mithilfe der Laser ständig ganz exakt gemessen. Dabei wird eine Genauigkeit von 200 bis 300 Picometern erreicht, was in etwa der Größe eines Atoms entspricht.

Gestein und Wasser – egal ob in fester oder flüssiger Form – beeinflussen dabei mit ihren Massen die Flugbahn der Satelliten im All. Je stärker diese Gewichtskraft ist, desto mehr wird der voranfliegende Satellit beim Überflug von ihr angezogen. Dadurch beschleunigt er und entfernt sich vom anderen Satelliten. Je schwächer diese Kraft ist, desto weniger wird der voranfliegende Satellit beschleunigt. So nähert er sich wieder dem hinteren an.

Diese minimale Veränderung im gegenseitigen Abstand wird kontinuierlich über jeden Umlauf um die Erde gemessen. Im übertragenen Sinne wiegen wir mit GRACE, wie Eisschilde und auch die Kontinente von Monat zu Monat ab- oder zunehmen. Doch das Wiegen geschieht nicht nur im All. Erst anhand von komplizierten Rechenverfahren am Boden werden die minimalen Bewegungen der Satelliten im Erdorbit in Schwerefeldwerte übersetzt und mit anderen Daten kombiniert. Dies ermöglicht unter anderem die Messung von Änderungen im Grundwasserspiegel mit einer Genauigkeit von einem Zentimeter auf 400 km Durchmesser – und das alle 30 Tage für die gesamte Erde. Hierbei spielt das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam eine wichtige Rolle: Es wird für den Aufbau des sogenannten Science Data Systems (SDS) auf deutscher Seite zuständig sein. In der Betriebsphase ist das GFZ dann für den wissenschaftlichen Betrieb von GRACE-C zuständig.

Nach dem Start der beiden GRACE-C-Satelliten an Bord einer Falcon-9-Rakete des US-Raumfahrtunternehmens SpaceX voraussichtlich im Jahr 2028 werden sie in rd. 500 km Höhe ausgesetzt. Etwa eine Minute später soll die erste Kontaktaufnahme mit einer Bodenstation stattfinden. Wie bereits bei GRACE und GRACE-FO werden auch die beiden GRACE-C Satelliten nach dem Start durch das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum im DLR (GOSC) in Oberpfaffenhofen gesteuert.

GRACE war eine gemeinsame Mission der US-Raumfahrtbehörde NASA und des DLR, die bis zum Jahr 2017 betrieben wurde und damit dreimal länger ursprünglich geplant aktiv war. Die wissenschaftliche Datenauswertung erfolgte durch die University of Texas und durch das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ). Der Betrieb oblag dem Deutschen Raumfahrtkontrollzentrum beim DLR in Oberpfaffenhofen und wurde vom DLR (aktuell der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und dem GFZ finanziert. Das NASA JPL managte die Mission im Auftrag des NASA Science Mission Directorate in Washington. Die GRACE-"Zwillinge" wurden von Airbus in Friedrichshafen im Auftrag der NASA gebaut. Dort entstanden, wiederum NASA-finanziert, auch die Nachfolger der Mission GRACE-FO, die seit ihrem Start am 22. Mai 2018 die Gravitationsmessungen fortsetzen.

Der deutsche Beitrag wird von der Deutschen Raumfahrtagentur mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) umgesetzt. Dies wird durch Beiträge der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) und der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) auf deutscher Seite unterstützt. Das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) wird dabei für die wissenschaftliche Auswertung der Missionsdaten und das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) gemeinsam mit der Firma SpaceTech GmbH in Immenstaad für die Entwicklung und den Bau der laserbasierten Abstandsmessung zwischen dem GRACE-Satellitenpaar zuständig sein.

Weitere Informationen:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<https://www.dlr.de/de>

(aus: Pressemitteilung Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt vom 19. März 2024)

Ökosystem See: Stickstoff wird bislang unterschätzt

Gerät das ökologische Gleichgewicht eines Sees aus dem Lot, ist das meist auf erhöhte Nährstoffeinträge zurückzuführen. Die Folge sind verstärktes Algenwachstum, Sauerstoffmangel, toxische Blaualgenblüten und Fischsterben. Um dem entgegenzuwirken, werden im Rahmen des Seenmanagements bislang primär Phosphoreinträge kontrolliert. Diesem Dogma stellt sich nun eine neue Studie entgegen, die das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) gemeinsam mit der Universität Aarhus (Dänemark) und der Estonian University of Life Sciences (Estland) durchführte. Die Forschenden zeigen, dass weltweit auch Stickstoff ein entscheidender Treiber für das Algenwachstum in Seen ist.

Einträge von Phosphor und Stickstoff aus landwirtschaftlichen Quellen und Klärwerken können das Algenwachstum in Flüssen und Seen stark beeinflussen. In der Binnengewässerkunde ging man bislang allerdings davon aus, dass das Algenwachstum in Seen in den meisten Fällen durch die Verfügbarkeit von Phosphor limitiert und angetrieben wird. Die Theorie dahinter: Steht in einem See nur wenig Phosphor zur Verfügung, sind die Algen in ihrem Wachstum eingeschränkt. Gibt es dagegen große Mengen an Phosphor, treibt dies das Algenwachstum enorm an. In diesem Erklärungsmodell spielt Stickstoff tatsächlich dann keine wesentliche Rolle. Begründen lässt sich dies damit, dass bestimmte Blaualgen im Wasser den in der Luft enthaltenen Stickstoff binden und in den See einbringen können. Ein langfristiger Mangel an Stickstoff sei daher in Seen nicht möglich. Und auch ein Überangebot an Stickstoff könne das Algenwachstum nicht fördern – und somit letztlich auch nicht zu einer Eutrophierung führen.

Diese Grundlage bildet die Basis für das Seenmanagement weltweit, bei dem der Schwerpunkt auf die Kontrolle von Phosphoreinträgen gelegt wurde, um der Eutrophierung von Seen entgegenzuwirken. Dabei kommt es immer wieder auch vor, dass eine Verringerung der Phosphoreinträge die Überdüngung nicht eindämmen kann. Und so stellte sich die Frage, ob es nicht noch eine Unbekannte in der Gewässergleichung gibt. Als solche identifiziert das Forschungsteam in seiner aktuellen Studie nun sehr deutlich den Stickstoff – und zeigt damit neue Wege für die Binnengewässerkunde, der Limnologie und das Management von Seen auf.

Weltweit gehören etwa 89 % der Seen zu den sogenannten Flachwasserseen mit einer mittleren Tiefe von bis zu 6 Metern. Für ihre statistischen Untersuchungen nutzten die Forschenden Langzeitmonitoring-Daten von 159 Flachwasserseen in Nordamerika, Europa und Neuseeland. Dabei setzten sie für jeden See über 5-Jahreszeiträume das Verhältnis zwischen den Gesamtstickstoff- und Gesamtposphormengen in Bezug zur sogenannten Chlorophyll-a-Konzentration als Maß für das Algenwachstum. Das Forscherteam wollte herausfinden, welche langfristigen Zusammenhänge zwischen dem Verhältnis der beiden Nährstoffe und dem Algenwachstum bestehen.

Ausgangspunkt der Studienidee waren einige Datenausreißer einer vorangegangenen Untersuchung zur Ökologie von Flachseen. Bei einigen der Seen korrespondierte der gemessene Nährstoffgehalt nicht linear mit einer entsprechend erhöhten bzw.

verminderten Chlorophyll-a-Konzentration. Daher fragte sich das Wissenschaftlerteam, inwieweit dafür vielleicht das Verhältnis zwischen den Nährstoffen Phosphor und Stickstoff verantwortlich seien. Denn es gab bereits einige wenige Studien mit Hinweisen, dass Stickstoff für das Algenwachstum in Seen möglicherweise doch eine wichtigere Rolle spielen könnte als bislang vermutet.

Die statistischen Analysen ihrer aktuellen Arbeit stützen die Theorie dieser Studien und widersprachen dem traditionellen limnologischen Konsens deutlich: Bei 60 % der untersuchten Gewässer liegt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine sogenannte duale Limitierung vor. Das würde bedeuten, dass sich bei der Mehrzahl der Seen beide Nährstoffe – Phosphor und Stickstoff – limitierend auf das Algenwachstum auswirken. Die Zusammenhänge waren eindeutig und entsprachen exakt dem, was bereits aus Laborexperimenten bekannt war. Nach eingehender Prüfung der Statistik blieb es dabei: Die Daten waren robust. Die gewonnenen Ergebnisse erhärten die These, dass Stickstoff in Seen kein Unbeteiligter ist. Und das Forscherteam konnte mit einer breiten Datenbasis erstmals zeigen, dass dies offensichtlich für Seen weltweit Gültigkeit hat. Das Wissenschaftlerteam regt nun weiterführende Untersuchungen an, sowohl im Freiland, als auch mittels Modellierung, mit denen die Ergebnisse ihrer Datenanalyse geprüft werden können.

Bildlich gesprochen haben die Forschenden mit ihrer Studie den Stickstoff in die Gleichung der Ökologie von Seen hineingeholt. Für die Praxis empfehlen sie, dass im Seenmanagement nun verstärkt auch auf Stickstoff geschaut wird. Benötigt wird eine langfristige Kontrolle der Nährstoffverhältnisse, damit ein effizientes und wirkungsvolles Eutrophierungsmanagement gelingen kann. Dabei müssen Einträge aus der Landwirtschaft, die in der Regel hohe Stickstoffgehalte haben, verstärkt in den Blick genommen werden.

Fachartikel:

Graeber, D., McCarthy, M.J., Shatwell, T., Borchardt, D., Jeppesen, E., Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Davidson, T.A. (2024): Consistent stoichiometric long-term relationships between nutrients and chlorophylla across shallow lakes. *Nature Communications* 15, 2024.

DOI: s41467-024-45115-3

Weitere Informationen:

Department Aquatische Ökosystemanalyse und Management, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
<https://www.ufz.de/index.php?de=34219>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 29. Februar 2024)

Studie zu Hochwasser und seinen Faktoren

Wenn Flüsse über die Ufer treten, können die Folgen verheerend sein, wie beispielsweise das katastrophale Hochwasser in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz im Jahr 2021 gezeigt hat. Um in Zukunft die Überschwemmungsschäden in Grenzen zu halten und die Bewertung von Hochwasserrisiken zu optimieren, muss besser verstanden werden, welche Variablen in

welchem Ausmaß zu extremen Ausprägungen von Überflutungen führen können. Mit Methoden des Erklärbaren Maschinellen Lernens haben Forschende des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) nachgewiesen, dass Überschwemmungen extremer ausfallen, wenn mehrere Faktoren an deren Entstehung beteiligt sind.

Die Lufttemperaturen, die Bodenfeuchte und die Höhe der Schneedecke sowie die tägliche Niederschlagsmenge in den Tagen vor einem Hochwasser – sie alle sind Variablen, die bei der Entstehung von Hochwasser eine wichtige Rolle spielen. Um zu verstehen, welchen Anteil die einzelnen Faktoren an Überschwemmungen ausmachen, haben Forschende des UFZ mehr als 3.500 Flusseinzugsgebiete weltweit untersucht und für jedes von ihnen Hochwasserereignisse zwischen den Jahren 1981 und 2020 analysiert. Das Ergebnis: Lediglich für rund ein Viertel der fast 125.000 Hochwasserereignisse war die Niederschlagsmenge der allein ausschlaggebende Faktor. Die Bodenfeuchte war in etwas mehr als 10 % der Fälle entscheidend, Schneeschmelze und Lufttemperatur spielten als alleiniger Faktor nur jeweils bei etwa 3 % eine Rolle. Dagegen waren für etwas mehr als die Hälfte der Überschwemmungen (51,6 %) mindestens zwei Faktoren verantwortlich. Dabei tritt mit etwa 23 % die Kombination aus Niederschlagsmenge und Bodenfeuchte am häufigsten auf.

Allerdings fanden die UFZ-Forschenden bei der Datenanalyse auch heraus, dass drei oder sogar alle vier Variablen gemeinsam für ein Hochwasserereignis verantwortlich sein können. So sind zum Beispiel Temperatur, Bodenfeuchte und Schneedecke immerhin für rd. 5.000 Überschwemmungen entscheidend gewesen, während alle vier Faktoren bei etwa 1.000 Hochwasserereignissen bestimmend waren. Und nicht nur das: Die Forschergruppe konnte auch zeigen, dass die Hochwasserereignisse immer extremer ausfallen, je mehr Variablen dafür ausschlaggebend waren. Lag der Anteil mehrerer Variablen an einem 1-jährlichen Hochwasser bei 51,6 %, waren es bei einem 5-Jahres-Hochwasser 70,1 % und bei einem 10-Jahres-Hochwasser 71,3 %. Je extremer die Hochwasser also ausfallen, desto mehr treibende Faktoren gibt es und desto wahrscheinlicher ist es, dass sie bei der Entstehung des Ereignisses zusammenwirken. Dieser Zusammenhang gilt oft auch für einzelne Flusseinzugsgebiete und wird von den Autoren als Hochwasserkomplexität bezeichnet.

Als Flusseinzugsgebiete mit geringer Hochwasserkomplexität stuften die Forscher zum Beispiel die nördlichen Regionen Europas und Amerikas sowie den Alpenraum ein, weil dort die Schneeschmelze als entscheidender Faktor für die meisten Hochwasser unabhängig von der Abflussmenge dominiert. Ähnliches gilt für das Amazonasbecken, wo oft die hohe Bodenfeuchte infolge der Regenzeit ein wesentlicher Auslöser von Überschwemmungen unterschiedlicher Ausprägung ist. In Deutschland sind zum Beispiel die Havel und die Zusam, ein Nebenfluss der Donau in Bayern, Flusseinzugsgebiete mit einer niedrigen Hochwasserkomplexität.

Zu den Regionen mit einer hohen Hochwasserkomplexität in den Flusseinzugsgebieten zählen dagegen vor allem Ostbrasilien, die Anden, Ostaustralien, die Rocky Mountains bis zur US-Westküste sowie die west- und mitteleuropäischen Ebenen. In Deutschland gehören dazu beispielsweise die Mosel und der Oberlauf der Elbe. Einzugsgebiete in diesen Regionen weisen in der Regel

mehrere Überflutungsmechanismen auf. So können Flusseinzugsgebiete in den europäischen Ebenen von Überschwemmungen betroffen sein, die durch das Miteinander von hohen Niederschlägen, Schneeschmelze und hoher Bodenfeuchte verursacht werden.

Entscheidend für die Frage, wie komplex Hochwasserprozesse sind, ist aber auch die Beschaffenheit der Landoberfläche. Denn jedes Flusseinzugsgebiet hat seine eigenen Besonderheiten. Dazu zählten die Forschenden unter anderem den Klima-Feuchtigkeits-Index, die Bodentextur, die Waldbedeckung, die Größe des Flusseinzugsgebiets und das Flussgefälle. In trockeneren Regionen etwa sind die Mechanismen, die zur Entstehung des Hochwassers führen, heterogener. Für moderate Hochwasser reichen dort schon wenige Tage mit viel Regen, während es für extreme Hochwasser länger auf feuchte Böden regnen muss.

Die Wissenschaftler nutzten für die Analyse das sogenannte "Explainable Machine Learning", also erklärbares maschinelles Lernen. Dabei wird zuerst aus den zehn Treibern – Lufttemperatur, Bodenfeuchte und Schneedecke sowie dem wöchentlichen Niederschlag, der für jeden Tag als einzelner Treiber genutzt wird –, die Abflussmenge und damit die Größe des Hochwassers vorhergesagt. Anschließend wird quantifiziert, welche Variablen und Variablenkombinationen jeweils zu der Abflussmenge eines bestimmten Hochwassers beigetragen haben. Erklärbares maschinelles Lernen nennt sich dieser Ansatz, weil man so versuche, die "Black Box" des trainierten Modells zwischen Hochwassertreibern und Abflussmenge im Hochwasserfall zu verstehen. Mit dieser neuen Methodik kann quantifiziert werden, wie viele Treiber und Treiberkombinationen relevant für die Entstehung und die Intensität von Überschwemmungen sind

Helfen sollen die Ergebnisse der UFZ-Forschenden künftig bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen. Die Studie leistet einen Beitrag, besonders extreme Hochwasser besser abschätzen zu können. Denn bislang erfolge die Abschätzung von Hochwasser, indem man weniger extreme Werte extrapoliere und so zu neuen Abschätzungen zur Abflussmenge komme. Das sei aber zu ungenau, da bei sehr extremen Hochwasserereignissen die einzelnen Faktoren einen anderen Einfluss bekommen könnten.

Fachartikel:

Jiang, S., Tarasova, L., Yu, G., Zscheischler, J. (2024): Compound effects in flood drivers challenge estimates of extreme river floods. *Science Advances*.
DOI: 10.1126/sciadv.adl4005

Weitere Informationen:

Department Compound Environmental Risks,
Helmholtz Zentrum für Umweltforschung
<https://www.ufz.de/index.php?de=50520>

Max-Planck-Institut für Biogeochemie
<https://www.bgc-jena.mpg.de/>

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 26. März 2026)

Weihenstephaner Verbundforschung für vitale Auwälder an der Mittleren Isar

Das ambitionierte Forschungsvorhaben "Revitalisierte Auwälder: Dynamik und Resilienz im Zeichen der Multifunktionalität (A-DUR)" wurde vom Zentrum Wald Forst Holz (ZWFH) am Campus Weihenstephan initiiert. Unter der Verbundprojektleitung der Technischen Universität München (TUM) und der Mitwirkung der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) wird auch ein Forscherteam der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) daran mitarbeiten, die aktuellen Entwicklungen in den Auwäldern besser zu verstehen und Strategien zu entwickeln, um die Leistungsfähigkeit dieser Ökosysteme zu verbessern. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für 5 Jahre gefördert und von Vertretern der Bayerischen Forstverwaltung, der Bayerischen Staatsforsten, dem Bund Naturschutz e. V., dem Leibniz Rechenzentrum sowie den Unternehmen Green-Solutions und SCIMOND in Projektpartnerschaften begleitet.

Mit der großzügigen Ausweisung der "Auwälder an der Mittleren Isar" als Naturwald nach Bayerischem Waldgesetz Art. 12a Abs. 2 im Jahr 2019 wurde die holzwirtschaftliche Nutzung weitgehend zugunsten anderer Ökosystemleistungen wie dem Klima- und Hochwasserschutz, der Biodiversität, der Naherholung sowie dem Wildtiermanagement eingestellt. Mit einer Fläche von 2.312 ha erstrecken sich diese vom Norden Münchens bis nach Landshut und bieten einen der artenreichsten Lebensräume der Region. Das Forschungsvorhaben untersucht die Auswirkungen der Nutzungsänderung auf Natur und Gesellschaft und erarbeitet evidenzbasierte Handlungsempfehlungen für das Management dieses ballungsraumnahen Waldgebietes.

Für dieses Teilprojekt des Vorhabens A-DUR zeichnet die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) verantwortlich. Unter Federführung der HSWT wird das Forscherteam mit Unterstützung von Studierenden und Bürgerwissenschaftlern die Artenvielfalt entlang der Nahrungskette erfassen. Dabei sind seltene Flugschiffarten genauso von Interesse wie die Ausbreitung von Neophyten. Ziel ist eine Naturschutzstrategie für die Auwälder der Mittleren Isar, die Lebensräume, Arten und gesellschaftliche Ansprüche zu vereinbaren. Diese beinhaltet u. a. die Einrichtung eines Stichprobennetzes unter Berücksichtigung von Standorts- und Nutzungsgradienten, die Erfassung der multitrophischen Diversität von epiphytische Moosen, Gefäßpflanzen, Fluginsekten, Tagfaltern und Vögeln, sowie die Ergänzung der wissenschaftlichen Daten durch "Citizen Science", die Identifikation von gebietstypischen Zielarten und Schlüssellebensräumen für das Naturschutzmanagement, eine Analyse von Zielkonflikten zwischen Prozessschutz, Artenschutz und Erholungsnutzung sowie die Erstellung eines Waldnaturschutzkonzepts.

Der Isarauwald ist ein besonders schützenswerter Naturraum, aus dessen Erforschung Erkenntnisse für den Schutz anderer Auwälder abgeleitet werden sollen. Weiterhin ist der Bereich Angewandte Standortlehre und Ressourcenschutz der HSWT, an dem Teilprojekt "Walddynamik und Kohlenstoffbindung" beteiligt. Dieses untersucht die Waldstruktur, Walddynamik und Kohlenstoffspeicherung der Auwälder nach Nutzungsaufgabe.

Weitere Informationen:

Professur für Botanik und Vegetationskunde,
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
<https://www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/institut-fuer-oekologie-und-landschaft/professur-fuer-botanik-vegetationskunde-und-gebirgsoekosysteme>

Projektseite Revitalisierte Auwälder – Dynamik und Resilienz im Zeichen der Multifunktionalität (A-DUR), Homepage Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
<https://www.hswt.de/forschung/projekt/1921-a-dur>

(aus: Pressemitteilung Hochschule Weihenstephan-Triesdorf vom 7. März 2024)

Grundwasserstände nach dem regenreichen Winter im Hinblick auf den Landschaftswasserhalt

Im Winter 2023/2024 hat es in Berlin und Brandenburg relativ viel geregnet. Für die Böden, Seen und Flüsse in der Region ist dies eine positive Veränderung. Wissenschaftler vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) und der Humboldt-Universität zu Berlin untersuchten hierzu den Landschaftswasserhaushalt am Beispiel des Demnitzer Mühlenfließes in Brandenburg. Ihre Daten zeigen: Das Wasser ist zwar im Boden angekommen, aber das Grundwasser hat noch nicht wieder den Zustand erreicht, den es vor dem Trockenjahr 2018 hatte. Zudem ist im niederschlagsreichen Jahr 2023 wegen der hohen Temperaturen besonders viel Wasser verdunstet.

Der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) zum Zustand der Bodenfeuchte in Deutschland zeigte in den vergangenen Monaten wenig Gelb, Orange und Rot. Demnach war es in weiten Teilen Deutschlands nicht einmal ungewöhnlich trocken und schon gar nicht traten die Kategorien moderate, schwere, extreme oder außergewöhnliche Dürre großflächig auf.

Erfreulich ist, dass das Wasserdefizit unserer Böden durch die Niederschläge im vergangenen Jahr und zu Beginn dieses Jahres wieder ausgeglichen wurde. In einigen Regionen Deutschlands sind die Böden völlig gesättigt. Das "Bodenwasserdefizit" ist eine wichtige Eingangsgröße für den UFZ-Dürremonitor. Dabei gilt der Wassergehalt in den oberen Bodenschichten bis 1,80 m Tiefe als Indikator für das Wasser in der Landschaft. Das tiefe gelegene Grundwasser wird mit diesem Ansatz jedoch nicht erfasst. Die aktuellen Daten zeigen, dass die Grundwasserstände in der sehr niederschlagsarmen Region Berlin-Brandenburg zwar deutlich angestiegen sind, aber immer noch nicht die "Normalwerte" vor den Dürrephasen im Jahr 2018 erreicht haben.

Bereits in einer Studie aus dem Jahr 2021 hatte das Forscherteam für das 60 km² große Demnitzer Mühlenfließ berechnet, dass es bis zu 4 Jahre mit gleichmäßig über das Jahr verteilten normalen Niederschlägen braucht, um das Defizit nach einer extremen Dürre wie in den Jahren 2018/2019 auszugleichen. Dabei ist das extreme Trockenjahr 2022 noch nicht berücksichtigt. Ein nasser Winter reicht also nicht aus, um das Grundwasser wieder aufzufüllen. Denn das Wasser muss erst mehrere Meter ungesättigten Boden speisen und durchdringen, bevor es die Grundwasserleiter erreicht. Und es darf auch nicht durch oberflächlichen

Abfluss von gesättigten Feldern verloren gehen. Die mehr als 30-jährigen Langzeitdaten des IGB aus dem Demnitzer Mühlenfließ zeigen insgesamt für den langfristigen Grundwasserstand seit 2011 einen fallenden Trend, der sich nach 2018 verstärkt hat.

Die Forscher weisen auch darauf hin, dass für die Wasserbilanz nicht nur der Niederschlag eine Rolle spielt, sondern auch der Anteil des Wassers, der wieder verdunstet. Die Verdunstung ist sogar die wichtigste Komponente der Wasserbilanz in Berlin/Brandenburg – vor allem, wenn wir von steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels ausgehen, wie sie beispielsweise im Jahr 2023 verzeichnet werden konnten. Dies führte zu einer deutlich höheren Verdunstung über Boden und Pflanzen. Regenreiche Frühjahre mit überdurchschnittlich warmen Temperaturen führen zu hohen Verdunstungsraten, vor allem wenn der Boden noch weitgehend vegetationsfrei ist. In Brandenburg ist die potenzielle Wasserverdunstung über Boden und Pflanzen im Jahresmittel fast immer höher als der Jahresniederschlag.

Bei niedrigem Grundwasserspiegel geht die Verbindung zu den Oberflächengewässern verloren: Weniger Grundwasser und höhere Verdunstung führen auch zu niedrigeren Wasserständen in den Oberflächengewässern. Im Vergleich zum Zeitraum von 2001 bis 2017 war der Durchfluss des Demnitzer Mühlenfließes in den Jahren von 2018 bis 2022 im Jahresdurchschnitt um 64 % reduziert. Häufiger führte der Fluss gar kein Wasser – teilweise über mehrere Monate hinweg. Das lag daran, dass aufgrund des niedrigen Grundwasserspiegels die Verbindung zwischen Grund- und Oberflächenwasser unterbrochen war. Dies war allerdings vor allem in nicht renaturierten, begrädeten Gewässerabschnitten der Fall. Gewässerabschnitte mit größeren Auen- oder Moorflächen zeigten eine höhere Resilienz gegenüber Trockenheit.

Es ist also notwendig, Flüsse mäandern zu lassen, damit die wichtige Verbindung von Grund- und Oberflächenwasser nicht unterbrochen wird. Denn die Renaturierung von Fließgewässern fördert den Wasserrückhalt in der Landschaft: Wenn das Wasser einen längeren, gewundenen Lauf hat, nicht so schnell oberirdisch abfließt und dadurch besser versickern kann, wird auch das Grundwasser gespeist. So hat sich die Schaffung von Auen und Feuchtgebieten am Demnitzer Mühlenfließ positiv auf das Grundwasser ausgewirkt: Nach Renaturierungsmaßnahmen in Teilbereichen des Einzugsgebietes im Jahr 2001 stieg der Grundwasserspiegel in den Jahren 2001 bis 2003 deutlich an.

Aufgrund des bodennahen Grundwasserspiegels in Feuchtgebieten und Auen kann der Fluss länger durchgängig Wasser führen. Das Grundwasser macht dann mehr als die Hälfte des Zuflusses aus. Umgekehrt bleibt der Grundwasserspiegel in den Feuchtgebieten auch in den Sommermonaten, wenn der Fluss nicht fließt, sehr nahe an der Bodenoberfläche. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, wie sich der Wasserfluss zwischen Grund- und Oberflächenwasser in einem renaturierten Flussbett selbst stabilisieren kann und auch bei Trockenheit weniger anfällig für Unterbrechungen und Trockenfallen ist.

Auch durch die Art der Bepflanzung kann viel für den Wasserrückhalt in der Landschaft getan werden: Wie das Wissenschaftlerteam in einer weiteren Studie zeigen konnte, haben unterschiedliche Landnutzungsformen einen entscheidenden Einfluss auf die Wasseraufnahme und -abgabe. So trägt ein Land-

nutzungsmosaik mit Mischkulturen dazu bei, dass mehr Wasser in den Boden infiltriert, ins Grundwasser gelangt und weniger verdunstet. Zudem muss der Anbau besonders wasserintensiver Feldfrüchte in unserer Region kritisch hinterfragt werden. Und auch der Waldumbau hin zu mehr Mischwäldern statt Nadelwald-Monokulturen ist dringend notwendig.

Eine weitere IGB-Studie zeigt die positiven Aspekte des Waldumbaus für das Demnitzer Mühlenfließ auf: Der Ersatz von Nadelwäldern durch altersgemischte Mischwälder mit jüngeren Laubbäumen hat nach den gewonnenen Modellrechnungen und Feldversuchen das größte Potenzial, die Gesamtverdunstung zu verringern und die Grundwasserneubildung zu erhöhen. In Wäldern führte eine Erhöhung des Laubbaumanteils um 50 % zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung im gesamten Einzugsgebiet um 11 %. Die gemischte Waldbewirtschaftung verkürzte auch die Grundwasserneubildungsraten, was eine schnellere Erholung der Bodenfeuchte und der Grundwasserspeicher nach Trockenperioden begünstigt.

Die Forscher resümierten, dass aus den vergangenen Trockenjahren ein Umdenken einsetzen sollte und die vorhandenen klimaresilienten Anpassungsstrategien konkret gesetzt werden sollten. Ein langfristig geplantes, nachhaltiges Management der Landschaften und der darin eingebetteten Gewässer werden in Zeiten des globalen Wandels immer wichtiger.

Fachartikel:

Luo, S., Tetzlaff, D., Smith, A., Soulsby, C. (2024). Assessing impacts of alternative land use strategies on water partitioning, storage and ages in drought-sensitive lowland catchments using tracer-aided ecohydrological modelling. *Hydrological Processes*, 38(4), e15126.

DOI: 10.1002/hyp.15126

Weitere Informationen:

Abteilung Ökohydrologie und Biogeochemie,
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
<https://www.igb-berlin.de/abt-1-oekohydrologie-und-biogeochemie>

(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei vom 4. April 2024)

Verbesserter Hochwasserschutz entlang der Elbe

Die Kooperationspartner Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein stellen am 11. April 2024 die Ergebnisse des Projektes "Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation an der Mittel-elbe von Tangermünde bis Geesthacht – 2D-Modellierung Mittel-elbe" im Rahmen einer Abschlussveranstaltung an Bord des Schiffes "Lüneburger Heide" auf der Elbe vor. Die Veranstaltung richtete sich an Fachleute verschiedener Disziplinen, Institutionen sowie Vertreter der Politik.

Im Rahmen des Projektes analysierte die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gemeinsam mit den an der Elbe liegenden Bundesländern Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein im Verlauf

der Jahre 2016 bis 2024 eine hohe Anzahl an Optionen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes des Elbe-Abschnittes von Tangermünde bis Geesthacht. Das Besondere des Projektes liegt in der Breite und dem Umfang der bundesländerübergreifenden Analyse. So wurden ca. 50 Optionen identifiziert und wissenschaftlich bewertet, die den Hochwasserschutz in der Elbe-Region zukünftig unter Berücksichtigung ökologischer Belange verbessern könnten.

Die analysierten Maßnahmenoptionen befinden sich zum jetzigen Zeitpunkt in verschiedenen Planungsstadien bzw. der Prüfung der Machbarkeit auf Bundesländerebene. Die Veranstaltung diente deren Vorstellung, der Diskussion und einem Ausblick zu den im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnissen. Zum Programm zählten mehrere Fachvorträge der beteiligten Kooperationspartner aus den Bundesbehörden, der Bundesländer, der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) sowie verschiedener Verbände. Die Ergebnisse sind innerhalb eines BfG-Berichtes veröffentlicht worden.

Zuständig für Hochwasserschutz und -vorsorge sind in Deutschland die Bundesländer. Die BfG forscht und berät zu unterschiedlichen Aspekten rund um das Thema Hochwasser und unterstützt damit die Bundesländer bei ihrer Aufgabe. Unmittelbar nach den verheerenden Hochwassern im Juni 2013 insbesondere im Elbe- und Donauegebiet fassten der Bund und die für den Hochwasserschutz zuständigen Bundesländer gemeinsam den Entschluss zur Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWSP). Dieses enthält eine bundesweite Aufstellung mit vorrangig umzusetzenden, überregional wirksamen Schutzmaßnahmen. Ziel ist es, diese Maßnahmen innerhalb eines Flussgebiets so zu kombinieren, dass möglichst viele Menschen von ihnen profitieren und Synergieeffekte mit dem Naturschutz und der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zu fördern.

Die Bundesländer Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Brandenburg und Sachsen-Anhalt haben mit der BfG das Projekt "Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation an der Mittel-elbe von Tangermünde bis Geesthacht" im Rahmen des NHWSP durchgeführt. Das Projekt trägt mit wissenschaftlichen Empfehlungen zu einer zielgerichteten Entwicklung konkreter Hochwasserschutzmaßnahmen bei. Die bereits etablierte überregionale fachliche Zusammenarbeit der Kooperationspartner wurde durch die Zusammenarbeit im Projekt noch intensiviert.

Weitere Informationen:

BfG-Bericht "Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation an der Mittel-elbe von Tangermünde bis Geesthacht. 2D-Modellierung Mittel-elbe"
<https://doi.bafg.de/BfG/2024/BfG-2175.pdf>

(aus: Pressemitteilung Bundesanstalt für Gewässerkunde vom 12. April 2024)

Das Umweltbundesamt feiert 50-jähriges Jubiläum – Rückblick auf 50 Jahre Umweltschutz

Vor über 50 Jahren brachte die sozial-liberale Koalition unter Kanzler Willy Brandt frischen Wind für den Umweltschutz. Mit dem Start des ersten Umweltprogramms der Bundesregierung

und der Ernennung des ersten deutschen Umweltministers im Jahr 1971 wird Umweltpolitik zunächst im Bundesministerium angesiedelt. Kurze Zeit später gründet die Bundesrepublik Deutschland als erstes europäisches Land eine wissenschaftliche Umweltbehörde: Am 22. Juni 1974 nahm das Umweltbundesamt (UBA) im Berliner Westen mit rd. 170 Mitarbeitenden seine Arbeit auf. Umweltthemen erhielten in Deutschland und Europa mehr und mehr Einzug in die politische Agenda. Seit dem Umzug des UBA an den Hauptsitz in Dessau-Roßlau im Mai 2005 ist die Zahl der Mitarbeitenden – heute über 1.800 an 16 Standorten in ganz Deutschland – mindestens genauso stark gewachsen wie die Bandbreite seiner Themen.

Anlässlich des 50. Jubiläums im Jahr 2024 führen eine neue Ausstellung am UBA-Hauptsitz und eine virtuelle Zeitreise Interessierte durch die Herausforderungen, Maßnahmen und Erfolge aus 50 Jahren UBA und zeigen eines ganz klar: In den vergangenen 50 Jahren hat sich in Sachen Umweltschutz vieles getan und das wird mit einem Jubiläumsfest am 15. Juni 2024 in Dessau auch öffentlich gefeiert.

Aufgabe des Umweltbundesamtes ist seit seiner Gründung, mögliche zukünftige Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt frühzeitig zu erkennen, zu bewerten und Politik und Gesellschaft praktikable Lösungen vorzuschlagen. Dazu erhebt das UBA umfassende Daten über den Zustand der Umwelt und berät mit diesem Wissen die gesamte Bundesregierung. Es forscht dazu in eigenen Laboren oder vergibt Forschungsaufträge an wissenschaftliche Einrichtungen und Institute im In- und Ausland. Darüber hinaus vollzieht das UBA Umweltgesetze, beispielsweise für den Emissionshandel oder die Zulassung von Chemikalien, Arznei- und Pflanzenschutzmitteln. Weitere Aufgabe ist seit 1974 die Information der Öffentlichkeit in Umweltfragen.

Wie facettenreich die Arbeit des UBA ist, zeigt ein Blick auf die Themenpalette: Die Mitarbeitenden arbeiten, forschen und informieren über unterschiedlichste Aspekte des Zusammenlebens von Mensch und Umwelt: vom Schutz der Weltmeere über die Abfallvermeidung und Ressourcenschonung, Auswirkungen unterschiedlicher chemischer Stoffe auf die Gesundheit der Menschen bis zur Mobilität und Ernährung von Morgen. Im Mittelpunkt der Arbeit stand und steht immer der Schutz von Mensch und Umwelt.

Das UBA heute: Derzeit arbeiten 1.837 (Stand: Juni 2023) Mitarbeitende an 16 Standorten des UBA. Der Hauptsitz ist seit dem Jahr 2005 in Dessau-Roßlau (Sachsen-Anhalt). Weitere Standorte hat das UBA in Berlin, Bad Elster (Sachsen), Langen (Hessen), Merseburg (Sachsen-Anhalt), Salzgitter (Niedersachsen) und Cottbus (Brandenburg). Darüber hinaus betreibt das UBA ein Messnetz mit sieben Messstellen von Zingst bis zur Zugspitze.

Um Umwelt- und Klimaschutz voranzutreiben und Wohlstand in den Grenzen der Ökosysteme weiterhin zu ermöglichen, ist eine verstärkte, interdisziplinäre Zusammenarbeit auf nationaler und internationaler Ebene notwendig. Sie erfordert einen ganzheitlichen Blick auf den Klimaschutz und die Arbeit zum Schutz von Mensch und Umwelt – beispielsweise durch die konsequente Transformation der Wirtschaft und Gesellschaft oder die Förderung der Zirkularität der Ökonomie, ohne die uns sozial gerechter und erfolgreicher Klimaschutz heute und in Zukunft nicht gelingen kann.

Das 50-jährige Jubiläum markiert einen Meilenstein, gibt dem UBA aber auch die Chance, Partnerschaften zu stärken und mit anderen Organisationen zusammenzuarbeiten, um globale Umweltziele zu erreichen – allen voran die Ziele des im Jahr 2019 verabschiedeten European Green Deals, der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 und damit einer lebenswerten Zukunft, der wir als Gesellschaft durch unsere gemeinschaftliche Transformationsarbeit optimistisch entgegen gehen wollen.

Mit seinem Jubiläumsfest am 15. Juni 2024 am Hauptsitz in Dessau-Roßlau lädt das UBA herzlich dazu ein, gemeinsam einen Blick auf die Herausforderungen, Meilensteine, Erfolge und Misserfolge der vergangenen 50 Jahre zu werfen und bei informativen Aktionen und Ständen der unterschiedlichen Fachleute und Mitarbeitenden des UBA einen Ausblick in die aktuellen Schwerpunkte und die Themen der Zukunft zu erhalten. Bei den unterschiedlichen Ständen und Mitmach-Aktionen ist für Groß und Klein von 10:00 bis 17:00 Uhr etwas dabei. Auch für musikalisches, kulturelles und kulinarisches Rahmenprogramm ist gesorgt. Der Eintritt ist frei, es ist keine Voranmeldung notwendig.

Weitere Informationen:

Ausstellung "50 Jahre Umweltbundesamt"

<https://www.umweltbundesamt.de/50-jahre-umweltbundesamt>

(aus: Pressemitteilung Umweltbundesamt vom 17. April 2024)

Gewässertyp des Jahres 2024: Flache Küstengewässer der Ostsee

Das flache Küstengewässer der Ostsee bietet vielen Lebewesen in Seegraswiesen, dichten Algenwäldern, Steinriffen und Muschelbänken eine Heimat. Fische, Krebse, Muscheln und Wasservögel finden hier ihre Rast- und Nahrungsplätze. In einigen Regionen leben sogar Seesterne, Schweinswale und Robben. Um diese Vielfalt zu schützen, streben die EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRRL) und die EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie einen guten ökologischen und chemischen Zustand in den Gewässern an. An diesem Ziel arbeiten die Ostsee-Anrainerstaaten auch regional im Rahmen der Helsinki Kommission für den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets zusammen.

Das Umweltbundesamt (UBA) lenkt zum internationalen Tag des Wassers 2024 die Aufmerksamkeit auf die Ostsee und kürt das "flache Küstengewässer der Ostsee" zum Gewässertyp des Jahres 2024. Der Gewässertyp kommt entlang der Küsten Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns in bis zu einer Seemeile Entfernung von der Küste beziehungsweise in bis zu 15 m Wassertiefe vor. Insgesamt hat dieser Gewässertyp einen Anteil von etwa 20 % der deutschen Meeresfläche in der Ostsee. Eine Besonderheit ist, dass von Westen nach Osten der Salzgehalt der Ostsee abnimmt. Dadurch leben einige Salzwasserarten, wie Seesterne, nur in den westlichen Gewässern.

Obwohl sich der ökologische und chemische Zustand der Küstengewässer bereits teilweise verbessert hat, ist ein guter Zustand noch nicht erreicht. Ein guter Zustand bedeutet hohe Wasserqualität und intakte Lebensräume, die nicht durch Verschmutzungen wie Müll oder Chemikalien, Lärmeinträge und andere Belastungen beeinträchtigt sind. Um einen solchen Zustand zu erreichen, müssen die Belastungen durch

die diversen Nutzungen wie zum Beispiel Schifffahrt, Tourismus oder küstennahe Landwirtschaft weiter reduziert werden. Zu diesem Ergebnis kommt die aktuelle Zustandsbewertung Deutschlands gemäß der EU-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie für die Ostseegewässer. Zum Entwurf der Zustandsbewertung konnte die Öffentlichkeit noch bis Mitte April 2024 Stellung nehmen.

Bereits zum 14. Mal benennt das Umweltbundesamt aus Anlass des Internationalen Weltwassertags der Vereinten Nationen am 22. März den Gewässertyp des Jahres. Ziel ist, auch als Beitrag zur Wasserdekade 2018 bis 2028 der Vereinten Nationen, auf die Vielfalt der Gewässer in Deutschland aufmerksam zu machen. Intakte Gewässer sind die Lebensadern einer Landschaft und für die Menschen äußerst wertvoll. Der diesjährige Weltwassertag am 22. März 2024 steht unter dem Motto "Water for Peace" – "Wasser für den Frieden".

Den Zustand der Gewässer zu überwachen, Defizite zu identifizieren und Maßnahmen zum Schutz der Gewässer abzuleiten, wird in der Europäischen Union seit dem Jahr 2000 durch die EG-Wasserrahmenrichtlinie und seit dem Jahr 2008 ergänzend durch die EU-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie geregelt. Viele Gewässer in Deutschland verfehlen einen guten ökologischen Zustand auf Grund von zu hohen stofflichen Belastungen und vielfältigen strukturellen Veränderungen. Es bedarf einer stetigen Anstrengung, diese Defizite zu minimieren und die Gewässer in einen ökologisch intakten Zustand zu bringen.

Weitere Informationen:

Themenseite "Gewässertyp des Jahres 2024", Umweltbundesamt
<https://www.umweltbundesamt.de/gewaessertyp-des-jahres-2024-flaches>

Kartendienst zum Gewässertyp des Jahres
<https://gis.uba.de/maps/resources/apps/gdj/index.html?lang=de>

Webseite der Vereinten Nationen zum Weltwassertag
<https://www.unwater.org/our-work/world-water-day>

HELCOM 50 years, Baltic Marine Environment Protection Commission – Helsinki Commission – HELCOM
<https://helcom.fi/helcom-at-work/events/helcom-50-years/>

Faltblatt Gewässertyp des Jahres 2024
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/faltblatt-gewaessertyp-des-jahres-2024>

(aus: Pressemitteilung Umweltbundesamt vom 22. März 2024)

Wasserdargebot und -bedarf vorhersagen: Talsperren smart steuern

Hochwasser, Dürren, Hitzewellen: Der Klimawandel stellt die Prognose von Wassermengen und die Steuerung von Talsperren zunehmend vor Herausforderungen. Die Stauanlagen spielen eine entscheidende Rolle im Hochwasserschutz und während Trockenperioden. Um sie an die Klimaveränderungen anzupassen, entwickeln Forschende der Universität Duisburg-Essen eine vorhersagebasierte Steuerung der Talsperren auf Basis Künstlicher Intelligenz. Das Projekt PROWAVE wird von der deutschen

Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die kommenden drei Jahre mit 348.000 € gefördert.

Die Wetterereignisse, die durch den Klimawandel verursacht werden, sind schwer kalkulierbar und stellen das Management der Talsperren und ihrer Einzugsgebiete vor eine große Herausforderung. Bisher werden Talsperren durch eine Reihe an Flusspegelständen gesteuert. Die Entscheidungen, die auf dieser Grundlage getroffen werden, sind aber reaktiv und langsam.

Künftig werden, dank der technologischen Fortschritte, die Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) die Talsperrenbetreibenden unterstützen. Hierzu werden spezielle Verfahren, wie z. B. LSTM-Netzwerke (Long Short-Term Memory) effiziente Steuerungsstrategien ermöglichen. Dadurch entstehen Werkzeuge, welche die wachsende Menge an Vorhersageinformationen gezielt nutzen. In Kombination mit modernen Datenanalyse-Tools ermöglichen sie eine proaktive Steuerung der Wasserverteilungssysteme, basierend auf zuverlässigen Prognosen des Wasserbedarfs und des Wasserdargebotes. Bisher war diese Prognose äußerst schwierig, da jeder simulierte physikalische Prozess bekannt sein musste. Methoden der Künstlichen Intelligenz machen nun den Unterschied. So können etwa neuronale Netze und Ensemble-Methoden die Echtzeitdaten nutzen und aus ihnen lernen, um komplexe Prozesse zu simulieren und über das erlernte Prozessverständnis die Vorhersagbarkeit von Extremwetterereignissen zu verbessern – und das bis zu 3 Monate im Voraus.

Das Ziel des Projekts PROWAVE ist die Entwicklung eines prototypischen Modells für den Betrieb von Talsperren und die Bereitstellung von Wasser für die Wasserversorgung. Er wird am Beispiel des Talsperrenverbundsystems der Harzwasserwerke entwickelt. Dieser integriert die Vorhersagen der Forschenden in ein komplexeres Optimierungsmodell, welches von einer beteiligten Ingenieurgesellschaft aus Aachen zur Verfügung gestellt wird.

Eine derartige proaktive Steuerung der Systeme soll es zukünftig frühzeitig und flexibel ermöglichen auf etwaige zukünftige Nutzungskonflikte zwischen der Wasserversorgung und anderen Wassernutzern zu reagieren. Langfristig möchten die Forschenden sowie die assoziierten Partner Ruhr- und Wupperverband mit dem Prototyp den Wandel hin zur smarten Steuerung von Talsperren erreichen, die den Anforderungen des Klimawandels gerecht wird.

Weitere Informationen:

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,
 Universität Duisburg
<https://www.uni-due.de/wasserbau/>

(aus: Pressemitteilung Universität Duisburg vom 16. April 2024)

Bedrohter See des Jahres 2024: das Stettiner Haff

Das Stettiner Haff, ein atemberaubendes Feuchtgebiet im Herzen Europas, ist seit Jahrzehnten durch die erhebliche Verschmutzung durch umliegende Industriebetriebe und Nährstoffeinträge aus industriellen und landwirtschaftlichen Aktivitäten in der Umgebung und flussaufwärts bedroht – Klimawandel setzt das

Haff zusätzlich unter Druck. Um auf den gefährdeten Zustand dieses einzigartigen Ökosystems im Herzen Europas aufmerksam zu machen, verleihen die internationale Umweltstiftung Global Nature Fund (GNF) und das von ihr koordinierte globale Seennetzwerk Living Lakes dem Stettiner Haff ihren Titel "Bedrohter See des Jahres 2024".

Europaweite Bekanntheit erlangte die Oder im August 2022, als ein Massensterben von Fischen für Schlagzeilen sorgte. Betroffen war der gesamte Verlauf des 840 km langen Flusses, der bei Stettin in das Haff und schließlich in die Ostsee mündet. Das Stettiner Haff, Teil des Oderdelta, erstreckt sich auf einer Fläche von 70.000 Hektar über beide Seiten der deutsch-polnischen Grenze und spielt eine Schlüsselrolle bei der Erhaltung der Artenvielfalt in der südlichen Ostsee. Es ist eines der wenigen ökologisch weitgehend unberührten Naturgebiete Mitteleuropas und ein Laichgebiet für Süßwassertiere. Als strategischer Kreuzungspunkt des East Atlantic Flyway ist das Oderdelta von entscheidender Bedeutung für Zugvögel und das blaue Herz eines der ersten Rewilding-Gebiete Europas.

Das Fischsterben von 2022 wirft ein Schlaglicht auf ein Problem, das schon lange vorher bestand: Seit Jahrzehnten ist das Stettiner Haff durch die erhebliche Verschmutzung durch die umliegenden Industriebetriebe und die Nährstoffeinträge aus industriellen und landwirtschaftlichen Aktivitäten in der Umgebung und flussaufwärts bedroht, hinzu kommt zunehmender Stress durch den Klimawandel. In den letzten Jahren hat der Schiffsverkehr in dem Gebiet zugenommen, sowohl was das Verkehrsaufkommen als auch die Größe der Schiffe betrifft, wodurch die Gewässer der Lagune noch stärker belastet werden.

Das Oderdelta mit dem Stettiner Haff in seinem Zentrum gehört zu den wenigen Resten unberührter Wildnis in Europa. Die Oder ist einer der letzten Flüsse in Europa mit nahezu unberührtem Flussbett und -lauf. Die Katastrophe vom Sommer 2022 mit unabsehbaren Auswirkungen auf die Artenvielfalt und das gesamte Auenlandschaftssystem zeigt die Verletzlichkeit des Ökosystems Stettiner Haff.

Das Oderdelta steht damit stellvertretend für den ökologischen Zustand der Gewässer in Europa. Nach der seit dem Jahr 2000 geltenden EU Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRR) sollte ein guter ökologischer Zustand bereits im Jahr 2015 erreicht werden – was jedoch von keinem EU Mitgliedstaat erfüllt wurde. Für das Einhalten der neuen Frist, dem 31. Dezember 2027, sind nur mehr vier Jahre Zeit. Mit der Nominierung eines grenzübergreifenden Feuchtgebietes in Europa, wollen der GNF und das Netzwerk Living Lakes auf den drängenden Handlungsbedarf innerhalb der EU hinweisen und fordern die fristgerechte Umsetzung der WRR und damit verbundener weiterer Gesetze.

Um den ökologischen Zustand des Oderdeltas und der Haffgewässer kurzfristig zu verbessern, sind nach den Experten vor Ort sofortige und umfassende Maßnahmen sowohl von Deutschland als auch von Polen erforderlich. Es muss alles getan werden, um die derzeitige Überlastung der Gewässerökosysteme zu stoppen und die Regeneration der empfindlichen Ökosysteme zu ermöglichen. Die Umsetzung der nationalen und europäischen Gesetzgebung muss sichergestellt werden, insbesondere der EU-Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der EU-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie.

Ein wichtiger Schritt für den nachhaltigen Schutz und die Entwicklung des Oderdeltas ist eine seit langer ausstehender grenzüberschreitender Strategie zwischen Deutschland und Polen zur natürlichen Regeneration des Stettiner Haffs. Diese Vernetzung ist entscheidend für die Wiederbelebung des Haffs als wichtiger Lebensraum für Wanderfische wie Stör und Maräne sowie für Übergangsbiootope als Lebensraum für prioritär geschützte Arten nach der EU-Habitatrichtlinie. Fischereiverbotzonen und ein Stör-Aktionsplan für Deutschland und Polen müssen die Aktivitäten zur Wiederherstellung der Fischbestände wichtiger Arten wie des Atlantischen Lachses, des Baltischen Störs und des Aals begleiten. Eine weitere wichtige Maßnahme ist die Stärkung des natürlichen Wasserrückhalts in der Aue. So können wichtige Ökosystemleistungen wie Wasserspeicherung und natürliche Filter wiederhergestellt werden. Auch der natürliche Hochwasserschutz wird durch die großflächige Wiederherstellung von Auen mit Auwäldern und Moorflächen verbessert.

Der Global Nature Fund (GNF) und das Netzwerk Living Lakes nominieren jedes Jahr am Welttag der Feuchtgebiete den "Bedrohten See des Jahres", um auf die weltweite Bedrohung von Seen und Feuchtgebieten aufmerksam zu machen. Das Stettiner Haff im Oderdelta ist das erste europäische Feuchtgebiet, das diesen Titel erhält. Der Titicacasee war "Bedrohter See des Jahres 2023".

Weitere Informationen:

Global Nature Fund

<https://www.globalnature.org/de/home>

(aus: Newsletter Global Nature Fund vom 15. April 2024)

Synergien in der Ostseeforschung stärken: IOW und Universität Klaipėda wollen Kooperation ausbauen

Das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und die litauische Universität Klaipėda werden künftig intensiver kooperieren und haben hierzu eine entsprechende Vereinbarung unterzeichnet. Damit wird die bereits bestehende Zusammenarbeit vertieft. Im Fokus stehen dabei der Ausbau der gemeinsamen Küstenmeerforschung, die möglichst effiziente Nutzung von vorhandener Forschungsinfrastruktur und innovativer Meeresforschungstechnologie sowie eine optimierte Abstimmung einheitlicher Verfahren zur Überwachung der Meeresumwelt in der Ostsee zwischen den Anrainerländern.

Die Vertreter des IOW und der Universität Klaipėda unterzeichneten das Memorandum of Understanding über den Ausbau der Zusammenarbeit in Klaipėda im Meeresforschungsinstitut der Universität. Das Kooperationsabkommen ist ein wichtiger Schritt, von dem insbesondere eine neue Generation von Meeresforscherinnen und Meeresforschern im Ostseeraum profitieren wird. Gemeinsam mit der Universität Klaipėda forschen und lehren die IOW-Mitarbeiter seit vielen Jahren im Bereich des Küstenzonenmanagements und der marinen Mikrobiologie. Drauf aufbauend sollen neue Forschungsfelder erschlossen und so die Wissensgrundlagen für eine gesunde Ostsee verbessert werden.

Die geplante Zusammenarbeit umfasst gemeinsame Forschungsaktivitäten, die Unterstützung von Austauschaufenthalten insbesondere junger Forschender, das Schaffen von Synergien sowohl

bei der Nutzung von Forschungsinfrastruktur als auch beim Einwerben internationaler Projektmittel und, nicht zuletzt, den Ausbau weiterer gemeinsamer Aktivitäten in der Lehre.

Zukünftig soll dabei unter anderem die Kooperation im Bereich der Fernerkundung ausgebaut werden. Das ist ein Forschungsfeld, in dem am IOW die Kapazitäten gerade erweitert wurden und an der Universität Klaipėda gibt es hierzu eine passende Arbeitsgruppe.

Ein wichtiges, bereits bestehendes gemeinsames Forschungsfeld ist eine vom IOW in Klaipėda etablierte Forschungsgruppe zum Thema Küsten- und Meeresmanagement. Hier geht es um den Einfluss von menschlichen Aktivitäten, Eingriffen und Maßnahmen in Küsten- und Meeressystemen, die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für Meeres- und Küstenschutzpolitik sowie um Fragen, wie ein nachhaltiger Wandel auf regionaler Ebene umgesetzt werden kann. Ein weiterer gemeinsamer, bereits etablierter inhaltlicher Schwerpunkt sowohl in der Forschung als auch in der Lehre ist die marine Umweltmikrobiologie. Hier wurde unter anderem das internationale, vom IOW geleitete Forschungsprojekt BaltVib unter wesentlicher Beteiligung der Universität Klaipėda realisiert, das sich mit der Frage beschäftigt, ob Seegrasswiesen und Muschelbänke die Gefahr von potenziell sehr gefährlichen Vibrio-Bakterien in der Ostsee mildern können.

Weitere Informationen:

Leibniz-Institut für Ostseeforschung, Warnemünde
https://www.io-warnemuende.de/de_index.html

Forschungsprojekt BaltVib
<https://www.io-warnemuende.de/baltvib-home-en.html>

(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Ostseeforschung vom 10. April 2024)

Bayern

Drei neue Moorprojekte in Schwaben

Der Moorschutz in Bayern wird weiter gestärkt. Weitere Investitionen fließen in den kommenden 5 Jahren in drei neue große Moorprojekte in Schwaben. Moorschutz ist als aktiver Klimaschutz anzusehen, da entwässerte Moore in Bayern pro Jahr rd. 6,7 Mio. t CO₂-Äquivalente freisetzen, was rd. 8 % der Gesamtemissionen Bayerns entspricht.

Hauptziel der drei neuen Moorprojekte in Schwaben ist es, den Wasserstand auf über 600 ha in insgesamt 5 Mooregebieten wieder anzuheben. Intakte Moore sind richtige Multitalente: Sie halten Wasser zurück, sie sind Lebensräume der Artenvielfalt und wichtige CO₂-Tresore. Moore speichern mehr Kohlenstoff als alle anderen Ökosysteme der Erde, pro Hektar etwa sechsmal so viel wie Wald.

Die neuen Moor-Projekte liegen im Gundelfinger und Leipheimer Moos in den Landkreisen Dillingen an der Donau und Günzburg, im Dattenhauser Ried im Landkreis Dillingen an der

Donau sowie im Gennachhauser Moor mit den Korbseemooren im Landkreis Ostallgäu. Sie werden durch das Bayerische Umweltministerium und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

Um die Vorhaben umzusetzen, arbeiten die Moormanager der Regierung von Schwaben mit den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, dem Amt für ländliche Entwicklung und dem Wasserwirtschaftsamt Donauwörth eng zusammen.

Die drei neuen Moorprojekte:

- Im Gundelfinger und Leipheimer Moos setzt der Freistaat Bayern in den nächsten fünf Jahren rd. 3,6 Mio. € ein, um in Kooperation mit dem Landschaftspflegeverband ARGE Donaumoos auf knapp 440 ha den Wasserhaushalt in den bayernweit bedeutsamen Wiesenbrüter-Lebensräumen zu optimieren.
- Im Dattenhauser Ried werden in Kooperation mit dem Zweckverband "Renaturierung Dattenhauser Ried" auf einer Fläche von etwa 100 ha Wiedervernässungsmaßnahmen durchgeführt und wertvolle Lebensräume, wie Flachmoore oder Pfeifengraswiesen, optimiert. Hierfür stehen insgesamt etwa 2,9 Mio. € zur Verfügung.
- In den zwei Mooregebieten Gennachhauser Moor und Korbseemoore wird die Wiedervernässung von Hoch- und Niedermoorböden auf einer Fläche von rund 100 ha angestrebt. Durch eine Zusammenfassung beider Gebiete zu einem Projekt können Synergieeffekte genutzt und die Umsetzung erleichtert werden. Im Gebiet der Korbseemoore soll der Hochmoorkörper wieder vitalisiert werden, um dort bestehende Lebensräume und Arten zu erhalten. Für das Projekt werden rd. 1,5 Mio. € bereitgestellt.

Bayern verfügt insgesamt über rund 220.000 ha Moorflächen. Der Freistaat will diese wertvollen Lebensräume noch besser schützen. Ziel der Bayerischen Staatsregierung ist es, bis zum Jahr 2040 insgesamt 55.000 ha wiederzuvernässen.

Weitere Informationen:

Portal "Moorschutz", Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
www.stmuvm.bayern.de/moorschutz.htm

(aus: Pressemitteilung Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz vom 18. März 2024)

Bayern

Ausreichende Winterniederschläge führten zur Erhöhung der Grundwasservorräte

Insbesondere in den vergangenen Wintermonaten 2023/2024 haben sich bayernweit die Wasserstände im Grundwasser deutlich erholt. Die reichlichen Regen- und Schneefälle waren durchaus positiv für den bayerischen Wasserhaushalt. Grund- und Oberflächenwasserstände haben sich deutlich aufgefüllt. Das

sind gute Voraussetzungen für die Entwicklung von Natur und Landschaft in diesem Jahr. Der Klimawandel und seine Folgen bleiben jedoch eine große Herausforderung. Die sichere Wasserversorgung in ganz Bayern hat höchste Priorität mit dem Ziel, die Wassersicherheit in allen Landesteilen jetzt und in Zukunft zu gewährleisten. Mit der Gesamtstrategie "Wasserzukunft Bayern 2050" wird daran gearbeitet, die Wasserversorgung im gesamten Freistaat weiterhin dauerhaft auf höchstem Niveau sicherzustellen. Die öffentliche Wasserversorgung hat dabei immer Vorrang vor anderen Nutzungen. Da besonders der November und der Dezember 2023 sehr niederschlagsreich waren, konnten sich neben dem Oberboden auch die tieferen Bodenschichten wieder mit Wasser auffüllen. In der Folge konnten sich so auch die meisten oberflächennahen Grundwasservorkommen regenerieren. Länger dauert es, bis das Grundwasser in den tieferen Stockwerken reagiert.

Bayernweit weisen aktuell (Stand März 2024) nur noch 10 % der oberflächennahen Grundwassermessstellen und Quellen im Niedrigwasser-Informationssystem Bayern niedrige oder sehr niedrige Grundwasserstände auf – gegenüber rd. 65 % im März 2023. In den tieferen Grundwasser-Stockwerken zeigen 40 % der Messstellen eine Niedrigwassersituation – gegenüber rd. 70 % im März 2023. Die Niederschlagssumme im bisherigen hydrologischen Winterhalbjahr (1. November 2023 bis 29. Februar 2024) beträgt für Nordbayern 396 mm, das entspricht 155 % vom Mittel der Jahre 1971 bis 2000. Für Südbayern beträgt die Niederschlagssumme im bisherigen hydrologischen Winterhalbjahr 472 mm, das entspricht 169 % vom Mittel 1971 bis 2000. Im Durchschnitt lagen in Bayern in den ersten drei Monaten des Quartals je nach Region normale bis mäßig bzw. sehr feuchte Verhältnisse vor. Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) wirken sich auf Grund der Vegetationsruhe und der geringen Verdunstungsverluste generell stärker auf die Sickerwasserraten und somit auf die Grundwasserneubildung aus als vergleichbare Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Die Niederschlagsmenge des Gesamtjahres 2023 lag in Bayern 10 % über dem langjährigen Mittel von 1971 bis 2000.

Mit der umfassenden Gesamtstrategie "Wasserzukunft Bayern 2050" wird insbesondere die Trinkwasserversorgung umfassend in den Blick genommen und an die zukünftigen Entwicklungen angepasst. Aktuell werden dabei bayernweit etwa 70 Maßnahmen umgesetzt. Alleine im Jahr 2023 setzte Bayern für die Themen öffentliche Wasserversorgung und Grundwasserschutz rd. 100 Mio. € ein. Auch der aktuelle Koalitionsvertrag enthält das Ziel, Wasser zu sparen, zu speichern und in alle Regionen Bayerns zu verteilen.

Weitere Informationen:

Portal "Niedrigwasser-Lagebericht Bayern",
Bayerisches Landesamt für Umwelt
www.nid.bayern.de

(aus: Pressemitteilung Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz vom 10. März 2024)

Nordrhein-Westfalen

Gewässerbewirtschaftung im Klimawandel: Ruhrverbandsgesetz soll Wasserversorgung in Trockenzeiten sichern

Der Ruhrverband sichert mit dem Ruhr-Talsperrensystem die Trink- und Brauchwasserversorgung der Region mit etwa 4,6 Mio Bewohnern. Durch die Steuerung der Talsperren werden die Abflüsse der Ruhr ausgeglichen und können so auch in Niedrigwasserzeiten aufrechterhalten werden. Entsprechende Vorgaben zur Pegelsteuerung sind im Ruhrverbandsgesetz verankert. Um ausreichende Füllstände in den Talsperren sicherzustellen, hatte das Umweltministerium Nordrhein-Westfalen in den vergangenen Trockenjahren bereits befristet reduzierte Mindestabflüsse durch Einzelfallentscheidung zugelassen.

Um das Fluss- und Talsperrensystem der Ruhr auf die Auswirkungen des Klimawandels vorzubereiten, soll die Steuerung der Abflussmengen nach einem Entwurf zur Änderung des Ruhrverbandsgesetzes künftig flexibler an lange Trockenphasen angepasst werden können. Hierzu sollen geringere Mindestabflüsse im Ruhrverbandsgesetz zugelassen werden, um auch in Trockenphasen eine ausreichende Trink- und Brauchwasserversorgung sicherzustellen. Ausgenommen hiervon sollen die gewässerökologisch besonders relevanten Monate April, Mai und Juni sein, um in diesem Zeitraum höhere Wasserstände in der Ruhr und ihren Nebengewässern für die sensible Laichphase, insbesondere der Fischart Groppe und der Rundmaulart Bachneunauge, zu gewährleisten.

Um den Folgen geringerer Wasserführung entgegenzuwirken, wird der Ruhrverband sich in einer begleitenden Vereinbarung mit dem Land NRW zu Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität verpflichten. Der Ruhrverband wird dabei bestehende Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe zur Behandlung von Mikroschadstoffen ausstatten. Zudem ist eine ökologische Aufwertung von Nebengewässern geplant (Wimberbach/Mühlenbach bei Wickede, Walpke und Hellefelder Bach bei Arnsberg), um die Populationen der Groppe und des Bachneunauges in der Ruhr zu stützen. Gemeinsam mit dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) wird der Ruhrverband ein begleitendes Monitoring von Gewässerchemie und Fischpopulationen durchführen.

Zur Verbesserung der Klimaresilienz der Talsperren wird daher auch der Hochwasserschutz in einer eigenständigen Begleitvereinbarung zwischen dem Land und dem Ruhrverband gewürdigt, in der sich der Verband zu weiteren Untersuchungs- und Analysemaßnahmen verpflichtet. Nach 10 Jahren ist eine Evaluierung der Gesetzänderung vorgesehen.

Weitere Informationen:

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

(aus: Newsletter Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen vom 4. April 2024)

Schleswig-Holstein

Künstliche Intelligenz für besseren Ostseeschutz: Innovatives Monitoring-Konzept erhält Lande

Die Buchten der schleswig-holsteinischen Ostseeküste sind in keinem guten ökologischen Zustand. Die saisonal auftretenden sauerstoffarmen Zonen breiten sich weiter aus, in der Folge treten beispielsweise massenhafte Fischsterben häufiger auf. Die Daten zur Bewertung des Umweltzustandes beruhen derzeit noch häufig auf so genannten "diskreten" Messungen, das heißt, es werden vor Ort Wasserproben genommen, die anschließend zur Auswertung ins Labor gebracht werden. Die Ergebnisse liegen dann erst nach Tagen oder gar Monaten vor.

Um den Umweltzustand künftig annähernd in Echtzeit erfassen, bewerten und möglichst schnell und effektiv Maßnahmen zur Verbesserung entwickeln zu können, soll nun Künstliche Intelligenz bei der Auswertung helfen: Das Pilotprojekt INSYST (INtelligentes SYSTem zum Küstengewässer-Monitoring mithilfe Künstlicher Intelligenz), das gemeinsam von GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) entwickelt wurde, nimmt die Umsetzung dieses innovativen Monitoring-Konzeptes konkret für die Eckernförder Bucht in Angriff. Für die Durchführung hat das Land Schleswig-Holstein einen Förderbescheid über insgesamt 750.000 € aus der KI-Strategie des Landes Schleswig-Holstein überreicht.

Das KI-Projekt INSYST ermöglicht in der Eckernförder Bucht die effiziente Bewertung der aktuellen Wasserqualität und kann als Frühwarnsystem eingesetzt werden, falls sich der Zustand verschlechtert. Damit zeigt das Projekt eindrücklich den direkten Nutzen für die Biodiversität und die Menschen in Schleswig-Holstein auf.

Die Förderung dieses Projekts markiert einen bedeutenden Schritt in Richtung eines effektiveren Ostsee-Schutzes. Die Integration von Künstlicher Intelligenz in Meeres-Monitoring-Konzepte bietet sich als vielversprechender Ansatz an, der jedoch bisher noch kaum genutzt wird. Mit dem Projekt INSYST soll ein entscheidender und innovativer Beitrag zur Entwicklung solcher Konzepte geleistet werden, um die marinen Ökosysteme zu schützen und zu bewahren.

Für das Projekt werden die Messdaten der Zeitserienstation Boknis Eck am Ausgang der Eckernförder Bucht verwendet. Boknis Eck wird seit dem Jahr 1957 regelmäßig monatlich auf eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Para-

meter beprobt. Diese Messreihen werden seit einigen Jahren durch Sensordaten eines fest installierten Unterwasserobservatoriums ergänzt, die über ein Datenkabel live abrufbar sind. Nach dem Verlust der Sensorstruktur im Sommer 2019 soll diese nun wieder bei Boknis Eck eingesetzt werden. Darüber hinaus steht ein kleinskaliges Computermodell der Ostsee am GEOMAR zu Verfügung, das die physikalischen Parameter in der Eckernförder Bucht sehr gut abbildet.

Zu Verarbeitung der großen Datenmengen soll versucht werden, Künstliche Intelligenz einzubinden. Die Anwendung der KI soll Datenmengen verknüpfen und nutzbar machen. So könne mithilfe der Kombination der Daten und verschiedener KI-Methoden eine Bewertung des Umweltzustands nahezu in Echtzeit ermöglicht werden. Dieses erlaubt dann auch die Testung hypothetischer Szenarien und Maßnahmen zur Umweltverbesserung im Voraus, um effektiver und nachhaltiger handeln zu können.

Das Projekt soll auch die Überwachungsbemühungen der zuständigen Schleswig-Holsteinischen Behörden vereinfachen. Es hilft beispielsweise dabei, geeignete Standorte für die Erfassung des Umweltzustands des Ökosystems Ostsee zu identifizieren oder den Schutz mariner Habitats zu verbessern.

Über ein Kommunikationskonzept sollen die Daten und Ergebnisse zudem allen Interessierten zur Verfügung gestellt werden. Über eine App soll es zudem die Möglichkeiten geben, sich mit eigenen Beobachtungen an der Datensammlung zu beteiligen. Die Projekt-Förderung wird durch die KI-Förderrichtlinie des Landes Schleswig-Holstein vorgenommen.

Weitere Informationen:

Die Boknis Eck Zeitserienstation

<https://www.geomar.de/zentrum/zentrale-einrichtungen/boknis-eck-zeitserienstation>

Homepage der Boknis Eck Zeitserienstation (auf Englisch)

<https://www.bokniseck.de/>

Arbeitsgruppe Distributed Systems an der CAU (auf Englisch)

<https://www.ds.informatik.uni-kiel.de/en>

CAU-Forschungsschwerpunkt Kiel Marine Science

<http://www.kiel-marine-science.de>

*(aus: Gemeinsame Pressemitteilung
des GEOMAR Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel,
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und
der Staatskanzlei des Landes Schleswig-Holstein
vom 4. März 2024)*

Personen

ERC Advanced Grant für UFZ-Ökologen Thorsten Wiegand

Der Ökosystemmodellierer Dr. Thorsten Wiegand vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) hat vom Europäischen Forschungsrat (ERC) rd. 2,5 Mio. € für Forschung im Bereich der theoretischen Ökologie erhalten. In den nächsten 5 Jahren wird er gemeinsam mit dem UFZ-Kollegen Prof. Andreas Huth eine Theorie zum Verständnis der räumlichen Dynamik und Stabilität von artenreichen Wäldern entwickeln.

In den kommenden Jahren wird das Leipziger ERC-Team Theorien zur Dynamik von Wäldern entwickeln, zum Beispiel für gemäßigte und tropische Wälder. Ziel des Projekts "SpatioCoexistence" ("Towards a Spatial Theory for Species-Rich Communities" ist, die Mechanismen besser zu verstehen, die die Koexistenz vieler Baumarten ermöglichen.

Die UFZ-Forschenden integrieren dabei mathematische Modelle und individuenbasierte Simulationen mit Methoden der Physik sowie der räumlichen Statistik. Sie verwenden dafür Daten aus Waldinventuren auf Flächen mit einer Größe bis zu 50 Hektar.

Der ERC Advanced Grant ist die höchstdotierte Fördermaßnahme der EU für einzelne Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und wird vom Europäischen Forschungsrat (European Research

Council, ERC) vergeben. Der ERC unterstützt damit quer durch die Disziplinen exzellente Forschende, die bereits über einen längeren Zeitraum international bedeutende Forschungsergebnisse erbracht haben. Die einzigen Kriterien, die bei der Vergabe von ERC-Advanced Grants berücksichtigt werden, sind die akademische Exzellenz der Forschenden und die außergewöhnliche Qualität des Forschungsprojekts, das einen besonderen Fortschritt zum Stand des Wissens erwarten lässt. Für die Ausschreibung im Jahr 2023 gingen 517 Anträge im Bereich der Biowissenschaften ein, von denen 75, entsprechend rund 15 %, gefördert werden.

Dr. Thorsten Wiegand studierte Physik in Marburg, wo er 1992 in Theoretischer Ökologie promovierte. Seitdem forscht er am UFZ. Dort befasst er sich mit räumlicher Ökologie und der Untersuchung der Rolle von Arteninteraktionen, räumlichen Mustern und räumlichen Prozessen für die Biodiversität und die Dynamik von Populationen und Artengemeinschaften.

Prof. Andreas Huth studierte Physik und Biophysik in Berlin und Marburg. Er promovierte im Jahr 1990 und forscht seit 2001 am UFZ. Seine Forschungsschwerpunkte sind ökologische Modellierung, Walddynamik, Vegetationsökologie, Kohlenstoffbilanzen, Fernerkundung und komplexe Systeme.

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 11. April 2024)

Ausbildung

Nachwuchsförderung in der Wasserforschung

Die "Water Science Alliance, WSA" hat im vergangenen Jahr ihren Sitz an das Zentrum für Wasser- und Umweltforschung der Universität Duisburg-Essen verlegt. Zuvor war sie an der Technischen Universität Dresden angesiedelt. Die Deutsche Wasserforschungsallianz hat nun eine Förderung in Höhe von 100.000 € für die Nachwuchsförderung von der Bernhard und Ursula Plettner-Stiftung eingeworben.

Seit dem Jahr 2010 stärkt die "Water Science Alliance, WSA" die interdisziplinäre Wasserforschung in Deutschland und international, indem sie diese sichtbar positioniert, aktiv Synergien fördert und sie mit angrenzenden Fachgebieten vernetzt. So entsteht eine zentrale Plattform für die Zusammenarbeit an übergreifenden Themen. Außerdem legt die WSA einen besonderen Schwerpunkt auf die Förderung von Forschenden zu Beginn ihrer Laufbahn. Denn junge Wissenschaftler tragen dazu bei, eine dynamische und nachhaltige Wasserforschungslandschaft zu schaffen, die den aktuellen und künftigen Herausforderungen in Wissenschaft und Lehre gewachsen ist.

Mit den eingeworbenen Fördermitteln der Bernhard und Ursula Plettner-Stiftung soll ein Karriere-Navigator für Nachwuchsforschende in der komplexen Wasserforschungslandschaft etabliert werden. Durch den Navigator können die Forschenden ihren Horizont erweitern, etwa indem sie an Konferenzen teilnehmen, Workshops organisieren oder daran teilnehmen, oder ein individuelles Mentoring durch renommierte Mitglieder der WSA bekommen.

Der "WSA Karriere Navigator" wird über einen Zeitraum von fünf Jahren Nachwuchswissenschaftler in den folgenden drei Schlüsselbereichen fördern:

1. **Berufliche Aus- und Weiterbildung & Qualifizierung:** Finanzielle Unterstützung für Reisekosten und/oder Gebühren im Rahmen relevanter Konferenzen, Workshops und Praktika, um die berufliche Ausbildung zu erweitern und neue Einblicke für die fachliche berufliche Weiterentwicklung zu gewinnen.
2. **Kommunikation & Netzwerkaktivitäten:** Organisation von Brainstorming-Treffen zu interdisziplinären Wasserforschungsthemen, Publikations- oder Antragsideen. Zudem wird die Teilnahme an WSA-Veranstaltungen, einschließlich kostenfreier Beteiligung an der jährlichen Water Research Horizon Conference und/oder "WSA Lectures", gefördert.
3. **Karriereplanung:** Unterstützung der individuellen Karriereplanung in der Wasserforschung durch Beratung und/oder Mentoring durch renommierte und erfahrene Mitglieder der WSA und/oder ihres Netzwerks.

Weitere Informationen:

Water Science Alliance Career Navigator

<https://www.watersciencealliance.org/career-navigator.html>

AG Aquatische Ökosystemforschung,

Universität Duisburg-Essen

https://www.uni-due.de/aquatische_oekosystemforschung/

Lehrstuhl für Ingenieurhydrologie und Wasserwirtschaft,

Universität Bochum

<https://www.hydrology.ruhr-uni-bochum.de/index.html.de>

(aus: Pressemitteilung Universität Duisburg-Essen vom 4. März 2024)

Interview

In der 6. Folge der Kolumne "Interview" geht es um die Entstehung von Starkregenereignissen und Sturzfluten. Dabei geht es nicht nur um die Ereignisse im Ahrtal und in Braunsbach, die noch Vielen im Bewusstsein sind, sondern auch darüber, inwieweit die Niederschlagsereignisse in den vergangenen Jahren extremer geworden sind und worauf man sich in Zukunft einstellen muss.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

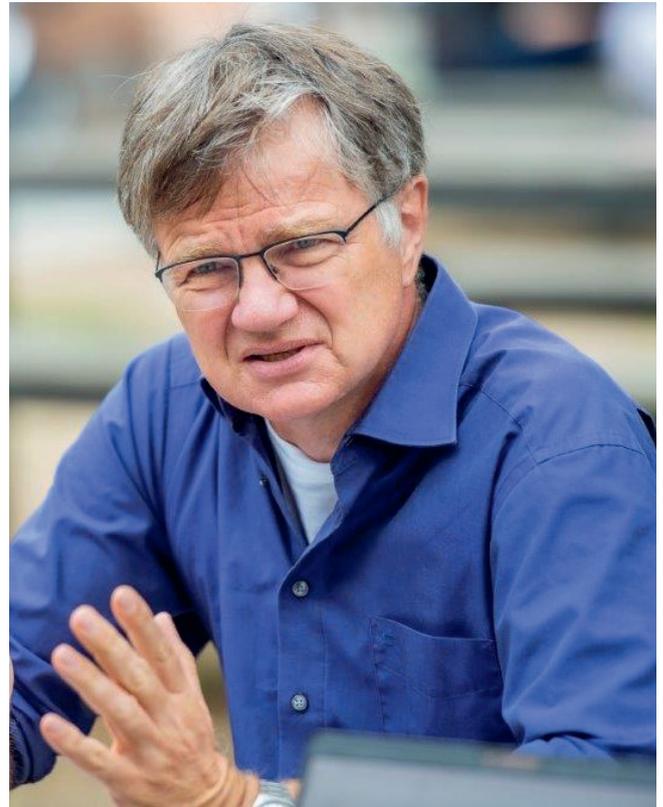
Extreme Wetterereignisse wie zum Beispiel Starkregen haben in Deutschland, so hat ja eine Untersuchung einer Studie des Deutschen Wetterdienst ergeben, in den vergangenen Jahren nachweisbar zugenommen. Die Ereignisse zum Beispiel an der Ahr sind ja noch vielen im Bewusstsein. Unter welchen Voraussetzungen entstehen Starkregen?

Antwort Prof. Dr. Bronstert:

Zunächst einmal vielen Dank für die Einladung zu diesem Podcast-Gespräch, über die ich mich sehr gefreut habe, um über dieses wichtige und interessante Thema gemeinsam zu sprechen. Wie entstehen extreme Starkregen? Das sind in der Regel konvektive Ereignisse in der Atmosphäre, die zu Starkregen führen. Bedingt durch schnell aufsteigende Luft wird sehr viel Wasserdampf in der Atmosphäre kondensiert, und je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen. Es bilden sich sehr starke Wolken, die sich dann wieder ausregnen und sehr viel Wasser abgeben. Das sind also die typischen Gewitterwolken. Daraus müssen dann nicht unbedingt immer sogenannte Sturzfluten entstehen. Das eine ist also der Niederschlag und dann in erster Linie der resultierende Abfluss, der gefährlich werden kann. Aber auch der Niederschlag kann schon zerstörend wirken und Schaden verursachen, gerade zum Beispiel für die Landwirtschaft. Aber das besonders Schadenträchtige daran sind eigentlich die Abflussspitzen, die lokal dann auf der Oberfläche auftreten und zu immensen Schäden führen können.

Wie lassen sich Starkregen genau erfassen und messen? Diese treten ja häufig auch kleinräumig auf.

Sie treten in einer kurzen Zeitspanne auf, und dann aber auch kleinräumig. Man kann vereinfacht sagen: Je stärker die Intensität, also die Menge des niederfallenden Regens, desto kleiner ist auch die räumliche Ausdehnung. Starke Niederschlagsintensitäten hängen somit mit einer kleinen Ausdehnung in der Fläche zusammen. Es geht hier um die Intensitäten, um die Menge an Niederschlagswasser pro Zeit, nicht um die Gesamtmenge. Deswegen treten derartige Ereignisse relativ kurz auf, in der Regel innerhalb weniger Stunden, auch innerhalb nur einer Stunde bis vielleicht fünf oder sechs Stunden. Deswegen ist es für die zuständigen Stellen zunächst einmal sehr schwierig, solche Regenereignisse zu messen. Es kann also sein, dass diese Ereignisse gar nicht durch Regenmessgeräte erfasst werden, weil da einfach zufällig keine stehen. So viele Messgeräte können in ganz Deutschland gar nicht stehen, dass man da jedes Starkregenereignis direkt mit einem Niederschlagsmessgerät erfassen könnte. Hinzu kommen dann auch die Abflüsse, also die durch Starkregen induzierten Abflüsse. Auch diese können vielfach



Prof. Dr. Axel Bronstert

Foto: Tobias Hopfgarten & Thomas Roesse, Univ. Potsdam

nicht direkt gemessen werden, weil so viele Flusspegel, vor allen auch an kleineren Flüssen, ebenso nicht existieren.

Ich schätze einmal, dazu gibt es mangels Daten keine wirklich verlässlichen Zahlen. Es ist davon auszugehen, dass nur ungefähr 20 % derartiger Starkregen in Deutschland durch die traditionellen Messgeräte, also die Niederschlagsmessung, aber auch die zugehörigen Starkregen induzierten Abflüsse erfasst werden. Die restlichen 80 % der Starkniederschläge gehen somit in Regionen nieder, wo sie nicht erfasst werden, aber vielleicht auch keinen Schaden verursachen. Über Wäldern zum Beispiel, wo sie dann nicht in das Bewusstsein der Menschen kommen. Da sieht man dann vielleicht nach dem Ereignis lediglich, dass Bäume umgestürzt sind oder eine Flutwelle durch die Bäche gelaufen ist, aber viel mehr nicht. Was auch dazu führt, dass das Auftreten und Häufigkeit von Starkregen im kleinen Raum und in kurzer Zeit sehr wichtig. Hier ist hinzuzufügen, dass diese meiner Meinung nach unterschätzt werden und sie treten häufiger auf, als wir dies denken.

Jetzt gibt es seit ungefähr gut 20 Jahren als weitere wichtige Möglichkeit der Niederschlags erfassung durch sogenannte Niederschlagsradar-Instrumente. Das sind spezifisch für diese Fragestellungen ausgestellte bzw. hergestellte Radargeräte. Diese hat der Deutsche Wetterdienst zum Beispiel in Betrieb und sie decken tatsächlich in deren Reichweite die gesamte deutsche Staatsfläche ab.

Dabei handelt es sich um ungefähr 25 Niederschlagsradare, jeder mit einem Radius von rd. 100 Kilometern. Diese erfassen dann auch die Wolken und damit auch ungefähr die Niederschläge, die aus diesen Wolken resultieren. Das löst also erstmal das Problem, dass wir die kleinräumigen Starkregen die auf dem Boden fallen zum Teil gar nicht mitbekommen, also messen können. Zudem werden die Niederschläge durch diese Radarinformationen auch in einer sehr schönen zeitlichen Auflösung, wie wir das nennen, also in Abständen von fünf Minuten die Informationen bekommen. Allerdings, und das ist sehr wichtig, sind diese Informationen, diese Daten aus den Niederschlagsradarinformationen wiederum nicht besonders exakt. Damit kennt man nunmehr zwar in etwa die Niederschlagsverteilungen, aber hierbei sind durchaus wiederum teilweise Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten mit einem Faktor von etwa 50 % enthalten, die aus verschiedenen Gründen resultieren. Von daher gilt als ideale Kombination die Nutzung dieser Radarinformationen zusammen mit den Informationen, die aus den Messungen auf der Landoberfläche resultieren.

Du bist jetzt sehr anschaulich auf die Problematik der auch der Niederschlagsmessung eingegangen. Gibt es ungeachtet dessen Kenntnis über Orte oder Gegenden in Deutschland, wo Starkregeneignisse häufiger auftreten als in anderen Regionen?

Ja, gute Frage. Es wird manchmal postuliert, dass solche Ereignisse häufiger dort auftreten, wo wir diese konvektiven Bedingungen der Niederschlagsentstehung haben. Also Gewitterentstehung, Gewitter hängen mit Wärme zusammen. Die meisten wissen, dass es im Winter wenig Gewitter gibt. Es gibt manchmal tatsächlich auch Schneegewitter, in Nordamerika die Blizzards. Aber die sind doch recht selten bei uns.

Im Sommer, wenn es warm ist, und die Erdoberfläche durch die Solarstrahlung erwärmt wird, wird dort auch die Luft erwärmt, direkt über der Erdoberfläche und steigt dann auf. Dadurch entstehen konvektive Systeme. Es werden hierfür also warme Bedingungen benötigt, starke Solareinstrahlung verbunden mit feuchter Luft, sonst entstehen die Wolken nicht und dann kann das im Prinzip aber überall passieren in Deutschland. Der Süden ist etwas wärmer in Deutschland als der Norden, aber nur etwas und es geht dann um lokale Bedingungen. Deswegen muss man schon feststellen, solche Starkregeneignisse können sich in Deutschland überall ereignen und wurde auch schon durch Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes bestätigt. Die Häufigkeit ist dabei etwas stärker im Süden Deutschlands, also in Bayern, Hessen, Rheinland, Pfalz und Baden-Württemberg. Aber tatsächlich können diese überall auftreten.

Jetzt haben wir Starkniederschläge und Starkregen angesprochen. Was versteht man nun genau unter Sturzfluten und was sind Auslöser dieser Sturzfluten, die ja dann auch zu plötzlichen Überschwemmungen führen können?

Ja, das ist eine sehr wichtige Frage. Sturzfluten sind Hochwasserereignisse oder Starkregen mit entsprechend starken Abflüssen, die durch diese zuvor jetzt beschriebenen Starkregen erzeugt werden.

Sturzfluten entstehen dann, wenn das Wasser, was durch den starken Niederschlag nicht in der Landschaft gespeichert werden kann, also nicht infiltriert oder sonst wie zurückgehalten wird, abfließt. Und je mehr und je schneller dieses Wasser zusammenfließt, desto stärker sind auch die zugehörigen Abflüsse. Deswegen sind im Gegensatz zu den Starkregen die Sturzfluten vor allen Dingen dort anzutreffen, wo auch die Topografie, also die Geländeneigung, im Wesentlichen, aber auch die Infiltrationsbereitschaft und Informationsfähigkeit der Landschaft so gestaltet ist, dass nicht viel Wasser gespeichert werden kann. Und dies besonders in steilen Lagen, in Regionen wie Gebirgen oder Mittelgebirgen. Das kann aber auch in leicht gewellten Landschaften auftreten. Da reicht es dann auch schon, die zusammenfließen Bedingungen, aber auch in Regionen, in der die Aufnahmefähigkeit der Landschaft besonders gering ist. Dies trifft vor allen für versiegelte Regionen zu, urbane Bereiche bzw. Städte. Das alles zusammen erhöht dann ganz deutlich die Bereitschaft der Landoberfläche, dass sich solche Sturzfluten bilden können.

Jetzt würde ich gerne mal auf die sogenannten Gefährdungsklassen zu sprechen kommen. Wie funktioniert die Einstufung von Starkregen und Sturzfluten in diese Klassen? Hierzu lassen sich ja Geographische Informationssysteme oder auch hydrologische Modelle anwenden.

Dazu gibt es in den letzten Jahren recht neue Entwicklungen und dieses Thema ist auch Bestandteil in der Forschung. Die Frage der man nachgeht lautet: Wie kann man im Vorhinein, also bevor solche Ereignisse tatsächlich auftreten diese prognostizieren und die Gefährdung in der Landschaft, in der Region einschätzen gegenüber solchen Sturzfluten. Ich habe ja schon gesagt, dass die Starkregen eigentlich überall in Deutschland oder in den Nachbarländern auftreten können. In manchen Regionen etwas stärker und häufiger wie z. B. in Süddeutschland, wobei diese Unterschiede relativ klein sind.

Von daher können Starkregen oder Sturzfluten überall in Deutschland auftreten. Und wenn zudem Bedingungen auftreten, die vorhin angesprochen wurden, also eine relativ geringe Aufnahmebereitschaft des Untergrunds, des Bodens, der Vegetation, aber auch eine Topografie dies das begünstigt, entstehen Abflüsse dann schnell zusammenfließen. Dann ist die Gefährdung besonders hoch einzuschätzen und diese Regionen lassen sich mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen feststellen. Da gibt es jetzt verschiedene Arbeiten dazu. Zum Beispiel Untersuchungen, die an der Professur für Hydrologie sowie der Professur für Umwelthydrosysteme der Universität Freiburg durchgeführt wurden, aber auch wir am Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam haben ähnliche Arbeiten zu extremen Sturzfluten durchgeführt in denen man zu beurteilen versucht, für welche verschiedene Regionen in Deutschland besondere Gefährdungen vorliegen. Dies ist dann die Kombination der Auftrittswahrscheinlichkeit von solchen sehr starken Regen plus der möglicherweise starken Bereitschaft, das Wasser schnell abzuführen, also schnell abfließen zu lassen in der Landschaft und zusätzlich noch eine geringe Rückhaltefähigkeit innerhalb der Landschaft. Dort sind dann die höchsten Gefährdungsklassen oder Gefährdungsstufen vorzufinden. Das heißt, man kann das durchaus, wenn man sich die Landschaft analysiert, auch mithilfe eines Geographischen Informationssystems, also der Grundlage, Daten, die über die

Landschaft bekannt sind, bezüglich des Bodens, der Topografie sowie der Landnutzung und der Vegetation eine grundsätzliche Gefährdungsstufe ableiten. Und dies auch immer mit Blick auf den sich vollziehenden Klimawandel.

Mit Blick auf den sich vollziehenden Klimawandel: Werden Veränderungen beim Auftreten von Starkregen und Sturzfluten festgestellt? Und wenn ja, welche genau?

Ja, und das ist auch noch gar nicht wissenschaftlich so lange bekannt und belegt und untersucht. Zwar sind die Auftretenshäufigkeiten dieser konvektiven Starkregen im Wandel begriffen, d. h. Starkregen von einer bestimmten Höhe von rd. 80 Liter pro Quadratmeter in einer Stunde, was wirklich schon ein recht starkes Ereignis beschreibt. Diese Starkregenereignisse hatten früher in einer bestimmten Region eine Auftretenswahrscheinlichkeit von vielleicht durchschnittlich 1 mal in 20 Jahren. Anders ausgedrückt bei 20 Jahren, also eine 0,05-Auftretenswahrscheinlichkeit oder 5 % pro Jahr. So lässt sich das in einer statistischen Analyse darstellen. Und diese Auftretenswahrscheinlichkeit hat sich nun in den letzten 30, 40 Jahren im Wert verändert, der nunmehr nicht mehr im Schnitt alle 20 Jahre auftritt, sondern alle 10 Jahre, und somit also eine verdoppelte Häufigkeit darstellt.

Wenn man nun die Daten der Niederschlagsintensitäten betrachtet, also die Menge Niederschlagswasser pro Zeit in kurzen Zeitabständen, kürzer als eine Stunde, wie z. B. in Zeitschriften von fünf Minuten, und das über viele Jahre, am besten in Jahrzehnten, so wäre dies eine interessante Darstellung. Solche Daten gibt es jedoch nicht oft, in Deutschland gab lange Zeit es nur wenige Stationen, dies das erfassen konnten. Inzwischen ist durch nachträgliche Aufbereitung von schriftlich vorliegenden Daten vom Deutschen Wetterdienst die Datenlage deutlich verbessert worden. Aber auch die Nachbarländer in der Schweiz und in Österreich sind nunmehr im Besitz solcher Daten. Für Deutschland entstammen die längsten dieser Datenreihen aus dem Ruhrgebiet, weil das Gebiet schon lange natürlich urbanisiert ist und sich dort hieraus die Siedlungswasserwirtschaft entwickelt hat. Dort liegen den urbanen Entwässerungsbehörden Datensätze in einem ein-minütigen Zeitschritt vor und werden nunmehr schon seit fast 100 Jahren erhoben.

Aus diesen Datensätzen kann man nun tatsächlich analysieren, ob sich in dieser Zeit beobachtete Starkregenintensitäten geändert haben, bzw. ist die auftretende Wahrscheinlichkeit von bestimmten Schwellenwerten erhöht oder vielleicht auch erniedrigt.

Auf der Basis derartiger Untersuchungen mit solchen Datenlage, d. h. mit sehr kurzen Zeitschritten von fünf Minuten, oder auch kürzer, kann man nun feststellen, dass sich diese Starkregenereignisse für diese Region, wo diese Daten vorliegen, zugenommen haben. Die Erklärung hierfür ist die globale Erwärmung.

Wenn man dabei nun betrachtet, wieviel Wasser dieser Starkregen von einem Gebiet abfließt, spielen dabei natürlich auch andere Faktoren eine Rolle, vor allen Dingen andere Effekte wie z. B. Rückhalteeigenschaften und gegebenenfalls Fließwege in der Landschaft, die besonders abflussfördernd sind. Und auch das kann man lokal und dann aber auch sehr unterschiedlich feststellen. Es existieren somit anthropogene gibt Auswirkungen

von Menschen auf diese Starkregen und Sturzfluten. Trotzdem hat die Natur auch ohne den Einfluss des Menschen ein recht starkes Portfolio parat an solchen Extremereignissen. Es ist somit nicht nur das Klima und der Mensch, sondern auch die Natur, die derartige Veränderungen verursacht.

Jetzt haben wir ja sehr ausführlich über die Entstehung und das Auftreten von Starkniederschlägen gesprochen. Nun würde ich mal gern um die Möglichkeiten ansprechen, dem zu begegnen. Welche deiner Meinung nach sinnvollen Maßnahmen gibt es denn, Starkregen und Sturzfluten entgegenzuwirken?

Zum Beispiel die Entsiegelung von Flächen oder der Bau von Wehren im Gelände wären zunächst zwei Möglichkeiten dem zu begegnen. Zudem auch den Rückhalt in der Landschaft könnte man als dritte Komponente betrachten. Was die Landschaft anbetrifft, da ist es durchaus sinnvoll, die Infiltration, also auch und den Rückhalt von Oberflächenwasser in der Landschaft zu fördern. Das wird auch sehr stark propagiert und ist auch durchaus wirksam. Jedoch muss man hierzu sagen, dass die Wirksamkeit begrenzt ist, denn man kann nicht so viel Wasser zurückhalten, dass es so gut wie nie zu einer Sturzflut in einer bestimmten Region führt.

Man darf sich jedoch von diesen Maßnahmen nicht zu viel erhoffen. Gleichwohl sind sie zu empfehlen und entsprechend ja auch schon inzwischen gesetzlich geregelt. Grundsätzlich sollte es klar sein, dass neue Versiegelungen der Landschaft dadurch nicht im Ganzen verhindert werden, aber dem durchaus entgegen gewirkt werden kann, indem zusätzliche Rückhaltevarianten, seien es kleine Rückhaltebecken oder auch Infiltrationsmöglichkeiten in der Landschaft geschaffen werden.

Jetzt kommt aber noch ein wichtiger Punkt, den wir noch nicht angesprochen haben, und zwar die Darstellung der Schäden. Man spricht grundsätzlich dann von Gefährdung, wenn sich mögliche Schäden für die Menschen ergeben können. Das ist ein wichtiger Punkt. Deswegen ist es sehr wichtig, dass innerhalb der zu betrachtenden Region, die Bereiche, die von solchen Sturzfluten besonders stark getroffen werden können, wie die Zonen entlang der Talsohlen, entlang der tiefen Linien, vielleicht auch der Seitentäler entlang der kleineren Bäche, besonders in die Untersuchungen einfließen. Insofern muss man sich Erstens bewusst werden, dass die Menschen, die dort angesiedelt sind, besonders gefährdet sind. Zweitens, dass dort in diesen sensiblen Bereichen möglichst keine neuen Bebauungen entstehen. Und schließlich Drittens, dass die dort stehenden Gebäude bzw. die u. U. auch neu gebaut werden, dann so gestaltet sind, dass sie bestimmte Überflutungen überstehen können.

Diese Gefährdungszonen werden wiederum oftmals von den Anwohnern gar nicht bewusst wahrgenommen, ebenso häufig auch nicht seitens der Behörden. Grundsätzlich werden Abschätzungen gemacht, wie weit sich die Gefährdung vollzieht. Diese Abschätzungen werden jedoch oft viel zu konservativ festgelegt, das heißt viel zu optimistisch. Die Gefährdung in der Fläche, also im Abstand von diesen tiefen Linien dieser Gewässer und Bächen sind tatsächlich in der Regel viel größer, als man das sich so in manchen optimistischen Szenarien ausgerechnet hat, obwohl das nach dem Stand der Technik berechnet wurde. Aber der

Stand der Technik ist da manchmal vielleicht nicht ganz auf dem wissenschaftlich neuesten Stand.

Das hat man besonders bei dem Hochwasser im Juli 2021 in der Ahrregion wirklich gesehen. Dort gab es wie in den meisten Regionen Deutschlands schon Hochwassergefahrenkarten, weil sie vor möglichen Ausuferungen an der Ahr, aber auch in den Nebengewässern gewarnt wurde. Diese Hochwassergefahrenkarten liegen den Behörden vor, ebenso auch in den meisten Bundesländern, aber leider nicht überall öffentlich zugänglich, so dass jeder Hausbesitzer oder Mieter und Anwohner, der in der Nähe eines Baches oder in den Flusstälern wohnt, ersehen kann, wie gefährdet er eigentlich ist.

Als Letztes möchte ich noch darauf hinweisen, dass solche Starkregenereignisse auch zu einem gewissen Grad derzeit schon vorhergesagt werden können. Nicht exakt genau, wie eine Aussage, in vier Stunden wird exakt in dieser Straße das Wasser für zwei Stunden einen halben Meter hochstehen. Aber man kann es bereits vielleicht deutlich besser vorhersagen, als das früher der Fall war. Eine Aussage, dann vom Deutschen Wetterdienst oder vielleicht auch von den Umweltbehörden erfolgt ist, dass Starkregenereignisse und nachfolgenden starken Abflüssen in den nächsten zwei Tagen zu erwarten sind. Solche Warnungen sind natürlich enorm wichtig. Und für derartige Warnhinweise, die heute schon möglich sind und auf mögliche Gefährdungen hinweisen, sind zukünftig noch Verbesserungen zu erwarten.

Nun sei noch mal ein Blick auf die Schäden ausgelöst durch Starkregen oder Sturzfluten gerichtet, die Du erwähnt hast. Ihr habt ja auch seinerzeit an Eurem Institut die Flutwelle von Braunsbach vom Mai 2016 im Rahmen einer Studie untersucht. Die Ergebnisse habt Ihr ja damals auch in der HyWa veröffentlicht. Was habt ihr untersucht und zu welchen Ergebnissen seid ihr gekommen?

Ja, also das Ereignis ist in der Fachwelt bekannt und ich würde es auch für Europa schon als wirklich spektakulär bezeichnen. Der Ort Braunsbach ist ein kleines Städtchen, eine Ortschaft im Hohenlohischen und nicht weit entfernt von dem Fluss Kocher. Der Kocher hat ein breites Tal, er fließt durch dessen Mitte und schlängelt sich durch ziemlich feuchte Wiesen. Die Uferbereiche sind jedoch nicht besiedelt. Vielleicht 500 Meter oder einen Kilometer vom Kocher entfernt fließt ein kleiner Bach, der Orlacher Bach, der durch die Ortschaft fließt. Bei normalen Wasserständen und Wetterverlauf ist der Bach sehr klein, vielleicht 20 Zentimeter tief und vielleicht zwei, drei Meter breit, und das zugehörige Einzugsgebiet ist wirklich klein, rd. sechs Quadratkilometer groß. Und genau über diesem Einzugsgebiet hing damals eine konvektive Gewitterzelle.

Das ereignete sich Ende Mai 2016 und in der Reanalyse haben wir innerhalb von 70 Minuten 140 Liter pro Quadratmeter Niederschlag festgestellt. Und diese Zelle hat sich eigentlich nicht bewegt, sie ist nicht weitergezogen. Das Wasser ist dann im Hochland oberhalb in diesem Einzugsgebiet von Braunsbach zusammengeflossen. Dort ist die Landnutzung größtenteils landwirtschaftliches Gebiet und nur ein geringer Teil, wir schätzten 20 % bis 30 % konnten die Böden aufnehmen. Der größte Teil des Niederschlagswassers ist gen Tal durch das Dorf hindurch zum Orlacher Bach hinabgeflossen. Wir haben für dieses Ereignis dann

eine forensische Analyse erstellt, also retrospektiv rückwärts. Dies auch bedingt daher, da wir nicht wussten, wie viel Niederschlag gefallen ist und dort keine Niederschlagsstation vorhanden war. Ebenso war nicht bekannt, wie viel Abfluss sich dort durch den Ort bewegt hat, da es auch keine Pegelstation gab.

Wir sind dann mit einer Gruppe an Nachwuchswissenschaftler, im Wesentlichen Masterstudierende, aber auch Doktoranden dorthin hingegangen, haben die Bewohner befragt und mithilfe der Bevölkerung analysiert, wie hoch der Wasserstand war, und wie hoch die Staubereiche im Dorf. Diese waren sehr hoch, mehrere Meter hoch, vier, fünf Meter. Es sind durch das abfließende Wasser viele Häuser zerstört worden. Mithilfe von vorhandenen Radaranalysen war es uns möglich nachzuweisen, wie stark der Niederschlag war. Das waren die vorhin erwähnten 140 Millimeter in 70 Minuten. Und wir konnten daraus auch abschätzen, wie stark der Abfluss war, etwa 140 Kubikmeter pro Sekunde. Das sagt jetzt zunächst wenig, aber man kann ungefähr sagen, das ist das Mittelwasser, also der normale Abfluss des Neckars in Heidelberg.

Dabei muss man nun noch berücksichtigen, dass dies nicht nur durch die oberflächlich abfließenden Wassermassen resultierte, sondern auch mächtige Mengen an Sediment, also Bodenmaterial sowie enorme viel Steine und Blöcke, und wir sprechen dann von sogenannten geomorphologischen Massenbewegungen und Hangrutschungen. Etwas, was sonst eigentlich nur aus dem Gebirge kennt, aus dem Mittel- oder Hochgebirge. Dort ist es die süddeutsche Schichtstufenlandschaft, die auch orographisch geformt ist, sicherlich um Braunsbach herum damit keine Flachlandschaft, aber eben auch keine Gebirgslandschaft. Dennoch kamen diese riesigen Geröllmassen aus dem Tal, mobilisiert durch diese starken Abflüsse die sich dann durch dieses Dorf gewälzt haben und im Wesentlichen dann dort liegen geblieben sind, also nicht bis hin zum Kocher.

Das war damit insgesamt betrachtet eine hydrologische Herangehensweise, wie man es aus der Risikoforschung, zum Beispiel bei der Technik zu den Untersuchungen von Flugzeugkatastrophen kennt. Erst wenn man die genauen Gründe und Ursachen gefunden hat, kann man für die Zukunft solche Ereignisse versuchen zu vermeiden, mit Mitteln der entsprechenden Landschaftsgestaltung, der Errichtung von Abwehrrbauten verbunden mit der Installation von Messgeräten.

Jetzt würde ich zum Schluss gern noch mal auf Projekte eingehen, die ihr am Institut hattet bzw. habt. Und stehen noch zukünftige Projekte an zum Thema Starkregen und Sturzfluten?

Ja, wir haben einige Untersuchungen und Studien zu dem Thema in den letzten zehn Jahren durchgeführt, und manche laufen momentan auch noch. Zuerst möchte ich erwähnen, dass es hierzu ein sogenanntes Graduiertenkolleg der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu Naturgefahren und -Risiken in einer sich ändernden Welt existiert. Dies gibt es hier in der Universität Potsdam am Institut für Umweltwissenschaften, wo verschiedene Naturschadensereignisse und auch die -risiken, also die möglichen Schäden und wie man diese reduzieren kann, untersucht werden. Dies bezogen nicht nur auf Hochwasser, aber auch auch solche Sturzflutenereignisse. Es sind daraus eine Menge

interessanter Ergebnisse abgeleitet worden. Weiterhin haben wir uns am Institut darauf spezialisiert Starkregen mithilfe von Radardaten zu analysieren aber auch mit Hilfe der bodengestützten konventionellen Messung versuchen wir, diese besser vorherzusagen. Eine Vorhersage für die nächsten Stunden, ähnlich, wie dies manche Wetter-Apps auch schon können, nur noch deutlich verbessert. Die Angaben der Wetter-Apps weisen ja nur aus, wann es wo vermutlich regnet, ohne Mengenangaben. Eine Angabe jedoch der Wahrscheinlichkeit, dass Starkregen dort wirklich auftritt, also eine quantitative Schätzung für die nächsten Stunden kann jedoch dann weiter helfen, wirkliche Vorwarnung zu betreiben.

Dann haben wir einige Projekte, die insbesondere Studien zu urbanen Starkregen- und Sturzflutereignisse beinhalten. Dies ist wichtig, weil einerseits die Aufnahmefähigkeit der Landschaften, d. h. der Oberflächen stark reduziert sind und andererseits das Schadenspotenzial in Städten oder in besiedelten, verdichteten Gebieten besonders groß ist. Und auch dort haben wir einige vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekte, die sich dieser Problematik widmen und auch versuchen, diese vorherzusagen und durch geeignete Maßnahmen die sich ergebenden Risiken zu reduzieren. Und als letztes möchte ich hier noch Projekte erwähnen, die sich mit ähnlichen Fragestellungen beschäftigen, jedoch in den mediterranen Gebieten, aber auch in den Trocken- und Halbtrockengebieten, zum Beispiel in Brasilien. Dort treten solche Ereignisse auch auf, besonders starke Niederschlagsintensitäten, die dann auf sehr trockene Böden fallen, die dann auch oft wenig Vegetation aufweisen. Die Abflussbildung vollzieht sich dann schneller und sehr stark. Diese Fragestellungen sind auch ein Schwerpunkt an unserem Institut.

Dr. Thomas Lüllwitz, HyWa-Redaktion:

Lieber Axel, vielen Dank für Deine Beteiligung an dem HyWa-Podcast zum Thema Starkregen und Sturzfluten. Es war wirklich sehr interessant, mit Dir über das Thema so umfangreich zu sprechen und es von dir dargelegt zu bekommen. Aber eben auch vor allem im Hinblick auf den Klimawandel die Fakten dargestellt bekommen zu haben, wie wichtig auch gerade die Studien hierzu derzeit sind. Besten Dank noch mal Axel.

In der nächsten Folge spreche ich mit Prof. Nicola Fohrer über das Thema Ökohydrologie, die in der in der Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft an der Universität Kiel tätig ist. Dabei wird es vor allem um die Auswirkungen vom Landnutzungswechsel auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Flussgebieten gehen sowie um gewässerökologische Untersuchungsmethoden.

Weitere Informationen:

Institut für Umweltwissenschaften und Geographie,
AG Hydrologie und Klimatologie, Universität Potsdam
<https://www.uni-potsdam.de/de/umwelt/forschung/ag-hydrologie-und-klimatologie/>



Dieses Interview ist auch Teil des HyWa-Podcasts "WasserGespräche".

WasserGespräche – der Podcast der Fachzeitschrift "Hydrologie & Wasserbewirtschaftung"

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

Deutsche Hydrologische Gesellschaft

Bericht vom Tag der Hydrologie vom 19. bis 21. März 2024 in Berlin

Wie gewohnt fand am Weltwassertag der diesjährige "Tag der Hydrologie 2024" vom 19. bis 21. März 2024 an der Freien Universität Berlin statt und wurde gemeinsam von der Humboldt-Universität zu Berlin (Prof. Dr. Dörthe Tetzlaff, Prof. Dr. Tobias Krüger, Geographisches Institut), der Technische Universität Berlin (Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann, Dr. Franziska Tügel, Institut für Bauingenieurwesen, Prof. Dr. Eva Paton vom Institut für Ökologie,) und der FU Berlin (Dr. Christian Reinhardt-Imjela, Prof. Achim Schulze, Dr. Klaus Vormoor vom Institut für Geographische Wissenschaften) ausgerichtet.

Unter dem Leitthema "Hydrologie im Anthropozän" wurden verschiedene Sessions zu den Themen "Hydrologie & Technik", "Hydrologie & Ökologie", "Hydrologie & Stadt" sowie "Hydrologie & Mensch" organisiert. Das Interesse an diesen Themen war groß, so dass mehr als 270 Fachleute aus ganz Deutschland der Einladung der Organisatoren folgten und sich im Henry-Ford-Bau der Freien Universität Berlin zu einem intensiven Austausch trafen.

Insgesamt brachten 34 Vorträgen und 115 Posterbeiträge einen fokussierten Einblick in den aktuellen Stand der Wissenschaft zu diversen Themen der Hydrologie. Vorausgehend sorgte die "Nacht der Hydrologie" vor dem Henry-Ford-Bau wieder für einen guten Start. Dieser Abend bot bereits erste spannende Diskussionen und die Möglichkeit, Kontakte zu knüpfen und zu intensivieren. Eine Exkursion zur urbanen Regen- und Grauwasserbewirtschaftung rund um den Potsdamer Platz rundete am Nachmittag des 21. März nach der Posterpreisprämierung das wissenschaftliche Programm ab.

Am Ende der sehr gelungenen Veranstaltung wurde traditionell der Staffelstab an die Ausrichter des kommenden Tags der Hydrologie 2025 übergeben, der im Zeitraum 19. bis 21. März 2025 in Augsburg stattfindet und gemeinsam von den Professoren Harald Kunstmann (Zentrum für Klimaresilienz der Universität Augsburg) und Peter Fiener (Institut für Geographie, Universität Augsburg) organisiert.

Verleihung des Deutschen Hydrologiepreises 2023 an Prof. Dr. Harald Kunstmann

Mit dem renommierten Deutschen Hydrologiepreis der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft (DHG) wurde dieses Jahr der Wissenschaftler Prof. Dr. Harald Kunstmann, Lehrstuhlinhaber für Regionales Klima und Hydrologie an der Universität Augsburg geehrt. Damit verbunden ist eine Ehrenmitgliedschaft bei der DHG. Die Laudatio hielt der Vizepräsident Prof. Dr. Axel Bronstert, der in seiner Ansprache die umfangreichen und innovativen Forschungsarbeiten sowie das Engagement von Prof. Kunstmann in der hydrologischen Gemeinschaft würdigte. Zusammen mit der Präsidentin der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft Prof. Britta Schmalz überreichte er Herrn Harald Kunstmann die Auszeichnung am 20. März 2024 in Berlin.

Zusammen mit seiner Arbeitsgruppe hat sich Herr Prof. Kunstmann besonders den folgenden Themen angenommen: Analyse zu Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlags- und Abflussdaten, Nutzung kommerzieller Mikrowellen-/Mobilfunkverbindungen-Daten sowie Arbeiten zum Wasserhaushalt und der Vorhersage hydrologischer Extreme. Neben seinen wissenschaftlichen Ergebnissen ist Harald Kunstmann sein Einsatz für die hydrologische Wissenschaft sehr hoch anzurechnen. Dies betrifft seine langjährige aktive Mitwirkung in der IAHS, der EGU, zu verschiedenen COP-Konferenzen, und vielen weiteren nationalen und internationalen Fachkommissionen. Hinzu kommt eine stetig steigende Öffentlichkeitsarbeit zu den Auswirkungen der Klimaänderungen, besonders auf Wasserressourcen, im regionalen Maßstab.

Die Deutsche Hydrologische Gesellschaft freut sich daher sehr, Herrn Prof. Harald Kunstmann den Deutschen Hydrologiepreis 2024 zu verleihen.

Ehrenmitgliedschaft für Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Für seine enormen Verdienste in der Nachwuchsarbeit innerhalb der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft, hat das Präsidium der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft dieses Jahr beschlossen, Herrn Dr. Christian Reinhardt-Imjela (FU Berlin) mit einer Ehrenmitgliedschaft der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft zu würdigen. Die Ehrenmitgliedschaft wurde am 20. März 2024 beim Tag der Hydrologie in Berlin überreicht.

Herr Dr. Christian Reinhardt-Imjela ist nun schon seit fast 10 Jahren in der Nachwuchsarbeit der DHG aktiv und hat in dieser Zeit sehr viel geleistet. Darunter zählt vor allem die Initiierung des Netzwerkes Junger Hydrologinnen, das in der deutschen hydrologischen Community sehr bekannt ist und sowohl von wissenschaftlichen Nachwuchs als auch von den erfahrenen Wissenschaftlern als Förderinstrument geschätzt wird. In diesem Arbeitskreis finden Early Career Scientists mit hydrologischer Ausrichtung eine ideale Plattform zur Vernetzung und Diskussion und können somit ihr Interesse an der Forschung vertiefen und die berufliche Entwicklung planen. Seit dem Jahr 2020 zählt hierzu auch das Mentoring-Programm der DHG, das auch von Herrn Reinhardt-Imjela ins Leben gerufen wurde.

In den letzten beiden Jahren hat Herr Reinhardt-Imjela zusammen mit dem ICWRGC, dem Internationale Zentrum für Wasserressourcen und globalen Wandel das neue Forum "Deutsche hydrologische Forschung im Kontext der UN-Wasserprogramme" gestartet und sehr erfolgreich umgesetzt.

Aus Sicht der DHG gilt es, dieses hohe und langjährige Engagement in der Nachwuchsförderung sowie der Förderung der nationalen und internationalen Vernetzung mit einer Ehrenmitgliedschaft der DGH für Herrn Dr. Reinhardt-Imjela zu würdigen.

Verleihung des Dissertationspreises der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft 2023

Der von der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft vergebene Dissertationspreis ging dieses Jahr an Dr. Songjun Wu vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB). Der Preis wurde durch die DHG-Präsidentin Prof. Dr. Britta Schmalz verliehen. Die Laudatio wurde von Frau Dr. M. M. Warter (IGB) gehalten, die für die leider erkrankte Frau Prof. Dörthe Tetzlaff, die die Dissertation von Herrn Dr. Wu betreut hat, eingesprungen ist.

Herr Wu hat in seiner Doktorarbeit, die auf sechs Publikationen basiert und in renommierten internationalen Journals erschienen sind, neue Erkenntnisse bzgl. der Quantifizierung von hydrologischen und Wasserqualitätsprozessen in einem Tieflandinzugsgebiet durch neuartige, prozess-basierte, tracerinformierte Modellierung, kombiniert mit extensiven Feldmethoden, gewonnen. Er profitiert von seinem interdisziplinären Hintergrund und schaffte es in seiner Forschung, Hydrologie mit Boden- und Pflanzenwissenschaften zu verbinden. Die Dissertation hat hohe nationale und internationale Relevanz mit Fragestellungen bzgl. Resilienz gegen Dürre und Wasserqualitätsproblemen von landwirtschaftlich- und forstwirtschaftlich genutzten Tieflandseinzugsgebieten.

Wir wünschen Herrn Dr. Songjun Wu für seine weitere Laufbahn alles Gute und weiterhin viel Erfolg.

Verleihung der Posterpreise beim Tag der Hydrologie 2024

Beim diesjährigen "Tag der Hydrologie 2024" in Berlin wurde am 21. März 2023 der von der DHG organisierte Posterpreis für ausgestellte Poster vergeben. Von allen Teilnehmern der Veranstaltung konnten Stimmen für die "Innovativste Studie", den "Besten Praxisbezug" sowie der besten "Wissenschaftlichen Qualität" abgegeben werden. Dieses Jahr war die Auswahl besonders groß, da über 100 Poster ausgestellt wurden.

In der Kategorie "Innovativste Studie" ging der 1. Preis an das Poster "Mit dem Smartphone dem Wasser auf der Spur. Beobachtungen trockenfallender Bäche" vertreten durch die Autorenschaft um Frau Mirjam Scheller (I. van Meerveld, S. Blance, J. Seibert) von der Universität Zürich. In der Kategorie „Bester Praxisbezug“ erhielt das Poster mit dem Titel "Serious Game zum Umgang mit Hochwasserfrühwarnungen – Spielerisch Hochwasser managen" von dem Autorenteam um Andy Philipp (J. Sallwey, A. Stefanova, A. Philipp, U. Müller) von der TU Dresden den ersten Preis. Der 1. Preis in der Kategorie "Beste wissenschaftliche Qualität" wurde dem Poster "Neue Wege bei der Analyse von Hochwasserereignissen: Innovatives Bemessungsverfahren für Stauanlagen" von Hubert Lohr und seinem Autorenteam (I. Huber, G. Demny, D. Bittner, S. Richter) zugesprochen.

19. Doktorandenworkshop zur hydrologischen Modellierung

Vom 16. bis 19. September 2024 findet nun schon zum 19. Mal der Doktorandenworkshop zur hydrologischen Modellierung (AG HYMOD) statt, der dieses Mal an der TU Dresden ausgetragen

und von der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft finanziell unterstützt wird. Der Workshop richtet sich an junge Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen, die ein Interesse an hydrologischen Methoden und Modellkonzepten zur Beantwortung wissenschaftlicher, hydrologischer Fragestellungen haben. Im Rahmen von thematisch zusammenhängenden Sessions und einem Rahmenprogramm stehen der Austausch und die Kommunikation zwischen den Teilnehmern in ungezwungener Atmosphäre im Vordergrund. Organisiert wird der diesjährige Workshop von Frau Tamara Leins, Frau Nane Weber, Herrn Moritz Kraft und Herrn Mas Rudolph vom Institut für Grundwasserwirtschaft der TU Dresden (Prof. Andreas Hartmann, Prof. Rudolf Liedl). Die Teilnahme am Workshop ist kostenfrei, lediglich die Kosten für die Unterkunft und Verpflegung (ca. 200 €) müssen selbst getragen werden. Der Workshop findet in der Evangelischen Tagungs- und Freizeitstätte Dresden statt. Die Teilnehmerzahl ist auf 30 Personen begrenzt. Anmeldung und Flyer unter: hydmod24@tu-dresden.de

DHG-Mitgliederversammlung

Im Rahmen der Tagung "Tag der Hydrologie 2024" wurde am 20. März 2024 ebenfalls die 15. DHG-Mitgliederversammlung abgehalten, die von der DHG-Präsidentin Prof. Dr. Britta Schmalz geleitet wurde. Es wurde über die Aktivitäten des DHG-Präsidiums seit der letzten Sitzung im März 2023 berichtet, u. a. über die Vorbereitung und Organisation der oben genannten Preise, die für 2024 geplanten Feldstipendien und das DHG-Mentoringprogramm sowie die vergangenen und geplanten Unterstützungen von Veranstaltungen, die zum Beispiel den "Tag der Hydrologie 2025" in Augsburg, den Workshop "Alpine Hydrologie" in Obergurgl oder den diesjährigen Doktorandenworkshop zur hydrologischen Modellierung umfassen. Das Präsidium wurde von den Mitgliedern für Ihre Arbeiten im letzten Geschäftsjahr entlastet.

Einrichtung von zwei neuen Arbeitskreisen

Aktuell werden zwei neue Arbeitskreise innerhalb der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft eingerichtet, in denen in den folgenden zwei Jahren im Rahmen von einzelnen Workshops ein intensiver Erfahrungsaustausch stattfinden soll und als Ziel jeweils ein Review verfasst oder ein weiterführendes wissenschaftliches Netzwerk initiiert werden soll.

Von Frau Dr. Pinar Pamukçu Albers und Frau Prof. Dr. Mariele Evers (Universität Bonn) wird der Arbeitskreis zum Thema "Wasserbezogene Ökosystemleistungen" ins Leben gerufen. Bei Interesse können Sie gerne Frau Albers unter folgender Adresse kontaktieren: ppamukcu@uni-bonn.de

Von Frau Prof. Dr.-Ing. Eva Paton (TU Berlin) wird der Arbeitskreis zum Thema "Monitoring & Modellierung von ETa" ins Leben gerufen. Bei Interesse können Sie gerne Frau Paton unter folgender Adresse kontaktieren: eva.paton@tu-berlin.de

*Prof. Peter Chiffard, Schriftführer
Deutsche Hydrologische Gesellschaft*

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

in der DWA (FgHW)

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

In diesem Jahr findet der 16. Hochwassertag der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt in Augsburg statt. Der Hochwassertag trägt den Titel "Extremereignisse: Neue Erkenntnisse, Maßnahmenplanung und Herausforderungen". Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Umgang mit Extremereignissen bei Hochwasser und Starkregen in der praktischen Umsetzung. Die Veranstaltung nimmt die Auswirkungen veränderter Wetterlagen auf Abflüsse und Schäden in den Fokus und berücksichtigt dabei besonders die Erfahrungen der Kommunen bei der Bewältigung extremer Hochwasser-/Starkregenereignisse. Mit der Fragestellung zur Zusammenarbeit von Kommunen mit den Expertinnen und Experten der Wasserwirtschaft und des Katastrophenschutzes in Bayern wird die Thematik des Hochwassertages 2023 erneut aufgegriffen. Die Veranstaltungsteilnehmer sind eingeladen, sich an der Diskussion aktiv zu beteiligen. Für den Erfahrungsaustausch und die Diskussion mit FachkollegInnen und Ausstellern steht in den Pausen wie immer genügend Zeit zur Verfügung. In diesem Sinne bietet der diesjährige Hochwassertag wieder die gute Gelegenheit, sich über die vielfältigen Aspekte beim Umgang mit dem Hochwasserrisiko zu informieren. Wir freuen uns, Sie in Augsburg zu begrüßen. Programm und Anmeldung finden Sie u. a. unter www.fghw.de.

Traditionelle Wiesenbewässerung schafft Schwammlandschaft 3. virtuelle "FgHW-Lunchbreak-Session" am 5. Juni 2024 – 13:00 bis 14:00 Uhr

Unter diesem Titel wird die Reihe der "FgHW-Lunchbreak-Sessions" fortgesetzt. Frau Julia Schrade (Junge DWA & Stabsstelle Wassermanagement der Großen Kreisstadt Forchheim) berichtet über die vielfältigen Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Erhalt der traditionellen Wiesenbewässerung in Franken und länderübergreifend.

Im Beitrag wird die Bewirtschaftung sogenannter "Wässerwiesen" durch die Traditionelle Bewässerung im Detail erläutert. Die Traditionelle Bewässerung zählt seit Dezember 2023 zum Immateriellen Kulturerbe der Menschheit durch die UNESCO. Erste schriftliche Zeugnisse über die Wiesenbewässerungen in Franken stammen aus dem 15. Jahrhundert. Die Vorteile der Traditionellen Bewässerung sind gerade in Zeiten des Klimawandels sehr gefragt, denn Wässergräben sind strukturbildend, biodiversitätsfördernd, verbindend. Wo andernorts die Wasserpegel in den Sommermonaten fallen, steigen sie in Forchheims

Trinkwasserbrunnen an. Grund dafür ist die traditionelle Wiesenbewässerung, welche den Landschaftswasserhaushalt erhält und die Schwammlandschaft schafft: Grundwasseranreicherung, Hitzevorsorge durch Verdunstungskühle entlang von Frischluftschneisen, Hochwasserschutz, Lebensraum, Biodiversität, Bodenbildung, Kohlenstoffsinken, Naherholung und die Existenzsicherung kleinbäuerlicher Strukturen. Zwei Großwehre östlich der Großen Kreisstadt Forchheim tragen maßgeblich zur Wässerung und somit zum natürlichen Klimaschutz und zur Klimaanpassung bei.

Die FgHW-Lunchbreak-Sessions sind ein kostenfreies Angebot der FgHW. Es werden im Jahr 2024 wieder in je drei Sessions kurz und prägnant Fachbeiträge zu den Perspektiven "Aktuelle Herausforderungen aus der wasserwirtschaftlichen Praxis" und "Aktuelles aus der hydrologischen Wissenschaft" angeboten. Angesprochen sind alle Interessierten aus Wissenschaft und Praxis. Sie sind herzlich eingeladen, wir freuen uns auf Ihre Diskussionsbeiträge! Bitte merken Sie sich schon die Folgetermine vor:

Mittwoch, 21. August 2024 – 13:00 bis 14:00 Uhr

Der Umgang mit Wasser – eine Herausforderung! Klimaangepasstes Wassermanagement – essenziell für unsere Zukunft!
Dr.-Ing. habil Uwe Müller, LfULG Sachsen

Mittwoch, 9. Oktober 2024 – 13:00 bis 14:00 Uhr

Entwicklung der Schwebstofffrachten an den Bundeswasserstraßen
PD habil Dr. Thomas Hoffmann, Bundesanstalt für Gewässerkunde

Mittwoch, 27. November 2024 – 13:00 bis 14:00 Uhr

Forschung und Praxis von Land- und Wasserwirtschaft gemeinsam denken: Über das Potenzial von langfristigen Landschaftslaboren für einen resilienten Landschaftswasserhaushalt
Johannes Mitterer, TU München

Die Lunchbreak-Sessions werden per Zoom als Videokonferenzen von der Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau (RPTU) angeboten. Herr Prof. Dr. Robert Jüpner, Leiter der FgHW, führt jeweils in die Thematik ein und moderiert die Veranstaltung. Nähere Informationen und den Zugangslink entnehmen Sie bitte der Homepage der FgHW (www.fghw.de) und unserem Newsletter.

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

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

Termine

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

Intermittency in Headwater Streams – Challenges and Opportunities from an Interdisciplinary Perspective

4. bis 6. Juni 2024 in Bonn

Webseite: hydro24@uni-bonn.de

Riverbasins 2024: Emissions in River Basins – Sources and Sinks

4./5. Juni 2024 in Budapest (Ungarn)

Webseite: www.riverbasins.kit.edu

Klima der Vergangenheit und gesellschaftliche Reaktionen auf Umweltveränderungen

5. bis 8. Juni 2024 in Bern (Schweiz)

Webseite: www.oeschger.unibe.ch/services/events/conferences/climast_2024/announcement

Gemeinsame Tagung von SETAC GLB und der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der GDCh

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

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

Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL)

16. bis 20. September 2024 in Dresden

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

XXVIII. Sächsische Altlastenkolloquium (SALKO)

5./6. November in Dresden

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

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

5./6. November in Koblenz

Webseite: www.bafg.de → Veranstaltungen

5. Workshop zur Alpen Hydrologie

20. November 2024 bis 22.11.2024 am Universitätszentrum

Obergurgl (Österreich)

Webseite: www.dhydrog.de

Erläuterung zur Titelseite

Künstliche Intelligenz und Hydrologie: Die drei Bilder auf der Titelseite wurden mit Hilfe des Bildgenerators DeepAI (<https://deepai.org>) erzeugt. Grundlage dieses Dienstes ist ein komplexes digitales Modell, das an einer großen Menge Daten trainiert wurde, um möglichst gut zum Kontext passende Simulationen zu erzeugen. So wie eine textgenerierende KI immer das Wort voraussagt, das am sinnvollsten als nächstes folgt, erstellt der KI-Bildgenerator basierend auf den Daten, mit denen er trainiert wurde, zu einer Texteingabe eine passende visuelle Darstellung.

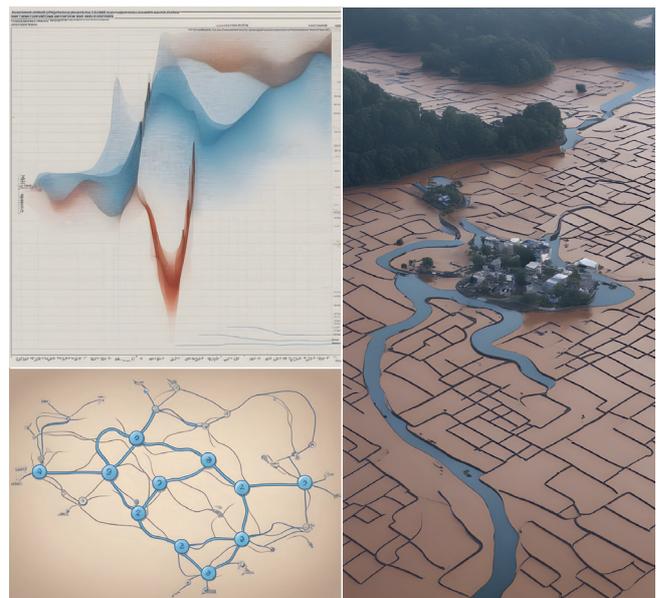
Für das Bild oben links auf der Titelseite wurden die Stichworte "forecast uncertainty estimation band view" bei DeepAI eingegeben, für das Bild rechts "flood prediction machine learning river in city", für das Bild unten links "river network connection similar as brain nerves nodes no text".

Die KI-generierten Bilder stehen nicht nur symbolisch für das Thema des ersten Fachartikels dieser Ausgabe – Abflussvorhersagen für Hochwasser – sondern auch für die dort vorgestellte Methode. Denn es ist möglich, generative KI-Modelle nicht nur mit Text oder Bildern, sondern auch mit meteorologischen oder hydrologischen Messdaten zu trainieren, sodass sie beispielsweise Wettervorhersagen oder Abflüsse und Pegelstände prognostizieren. Wie sich solche KI-basierten Hochwasservorhersagen konkret umsetzen lassen, und inwieweit sich ein solches Modell im Vergleich mit "klassischen" Systemen bewährt, wird im Artikel exemplarisch vorgestellt.

*PD Dr. Uwe Ehret, Dr. Ralf Loritz, Orhan Tanrikulu
Institut für Wasser und Umwelt,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe*

*Dr. Ingo Haag
HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt
und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe*

*Ute Badde
LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe*



KI-generierte Abbildungen seitens der Autoren