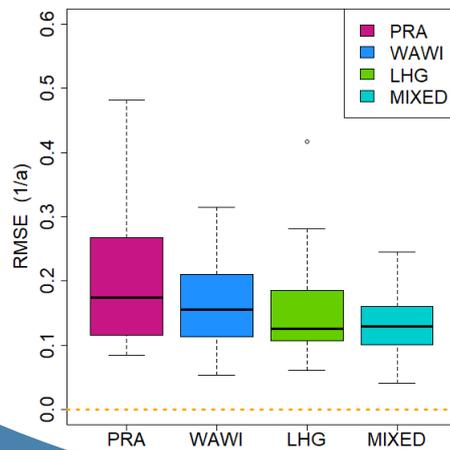
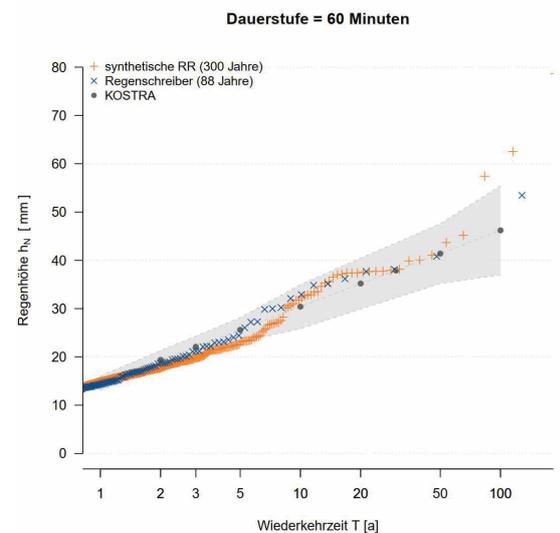
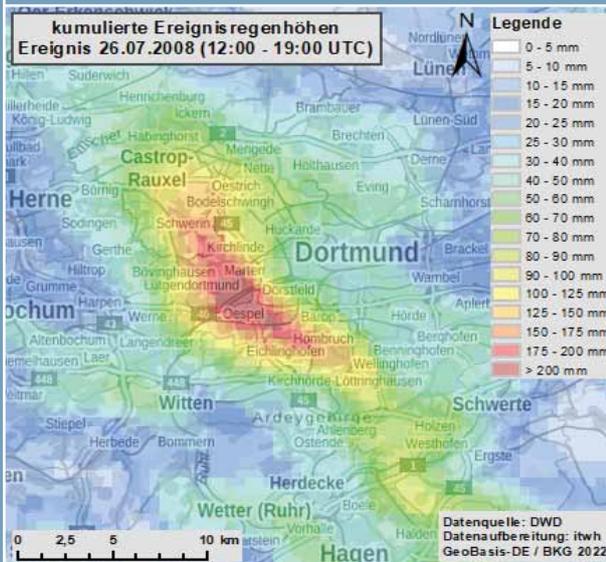


# Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Hydrology and Water Resources Management



Artikel mit Fachdaten: Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland

Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerosivitätsfaktors auf Basis von Monatswerten

Projektbericht: Die Bedeutung mechanischer Schwimmerschreibpegel

## Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

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

- Hydrologische Prozesse und Kreislaufgeschehen von Binnen- und Küstengewässern
- Bewirtschaftung der Wasservorkommen
- Wasser- und Stoffflüsse, Gewässerschutz
- Ökologische Studien und Bewertungen
- Limnologische Untersuchungen
- Darstellung und Entwicklung von Grund- und Bodenwasser.

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

### Redaktionsausschuss (Stand: Dezember 2021)

Prof. Dr. Axel Bronstert,  
Universität Potsdam

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

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

Prof. Dr. Bruno Merz,  
Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam

Dr. Volker Mohaupt,  
Umweltbundesamt

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

Prof. Dr. Britta Schmalz,  
Technische Universität Darmstadt

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

Sebastian Wrede,  
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

#### Redaktion:

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

Proofreading Englisch: ISL Übersetzungsbüro, 56068 Koblenz

#### Anschrift:

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

#### Verlagsrechte:

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

#### Hinweis:

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

#### Erscheinungsweise:

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

#### Herausgeber:

BfG für die gewässerkundlichen Fachverwaltungen des Bundes und der Länder

#### Satz und Druck:

Druckerei des BMDV, Bonn

ISSN 1439-1783

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

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

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

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

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

### Assoziierte Editoren (Stand: Dezember 2021)

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

Prof. Dr. Günter Blöschl,  
Technische Universität Wien

Prof. Dr. Markus Casper,  
Universität Trier

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

Norbert Demuth,  
Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz

Dr. Svenja Fischer,  
Ruhr-Universität Bochum

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

Dr. Dr. Dietmar Mehl,  
biota GmbH

Prof. Dr. Lucas Menzel,  
Universität Heidelberg

Prof. Dr. Konrad Miegel,  
Universität Rostock

Prof. Dr. Günter Meon,  
Technische Universität Braunschweig

Prof. Dr. Elisabeth I. Meyer,  
Universität Münster

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

Dr. Enno Nilson,  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Angela Pfister,  
Emschergenossenschaft

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

Prof. Dr. Frido Reinstorf,  
Hochschule Magdeburg-Stendal

Prof. Dr. Benny Selle,  
Beuth Hochschule

Prof. Dr. Benedikt Toussaint,  
Taunusstein

Prof. Dr. Markus Weiler,  
Universität Freiburg

Prof. Dr. Rolf Weingartner,  
Universität Bern

# Inhalt | Contents

## Vorwort | Foreword

Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland	<b>104</b>
--	------------

## Fachartikel | Scientific reports

**DOI: 10.5675/HyWa\_2022.3\_1**

**Uwe Haberlandt, Stefan Krämer, András Bárdossy, Anne Bartens, Philipp Birkholz, Micha Eisele, Lothar Fuchs, Ole-Christian Herrmann, Andreas Kuchenbecker, Stefanie Maßmann, Ross Pidoto, Thomas Müller, Jochen Seidel & Klaus Sympher**

Artikel mit Fachdaten: Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland  
Article with technical data: Continuous synthetic precipitation for Germany for design in urban hydrology

**106**

**DOI: 10.5675/HyWa\_2022.3\_2**

**Janine Köhn, Marcus Beylich, Ralph Meißner, Holger Rupp & Frido Reinstorf**

Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten

Regression models for the evaluation of the rainfall factor with regard to climate change on the basis of monthly values

**122**

## Hydrologische Notizen | Hydrological notes

Aktuelles   Latest news	<b>137</b>
-------------------------	------------

Personen   Persons	<b>157</b>
--------------------	------------

Projektberichte – Workshops – Konferenzen | Projekt reports – Workshops – Conferences

Die Bedeutung mechanischer Schwimmerschreibpegel des Bremer Uhrmachers C. B. Kappert für die Unterweserkorrektur durch Ludwig Franzius

**158**

## Nachrichten | News

Deutsche Hydrologische Gesellschaft   German Hydrological Society	<b>166</b>
---	------------

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften   Association for Hydrological Sciences	<b>168</b>
---	------------

Neue Publikationen   New publications	<b>170</b>
---------------------------------------	------------

Termine   Events	<b>171</b>
------------------	------------

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

## Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland

Mit einem Wiederbeschaffungswert von etwa 687 Mrd. € stellen die Kanalnetze in Deutschland das bedeutendste Anlagevermögen der Kommunen und Städte dar. Die Kanalnetze wie auch Rückhaltebecken und Entlastungsanlagen werden unter Vorgabe einer Versagenshäufigkeit dimensioniert. Diese liegt bei Kanalnetzen in Abhängigkeit des Schutzbedürfnisses der Bebauung im Bereich von einmal pro Jahr bis einmal in 10 Jahren, d. h. Überlastungen durch Wasserstände bis zur Geländeoberkante sollten nicht häufiger auftreten. Die Versagens- oder Bemessungshäufigkeiten sind in den einschlägigen Regelwerken und Normen festgelegt. Diese definieren dabei einen Entwässerungskomfort, der sich mit dem Beginn des systematischen Ausbaus der Kanalisationsnetze seit der Gründerzeit über die vergangenen nahezu 150 Jahre etabliert hat und der mit der bis heute anhaltenden Ausweitung der Siedlungsflächen einhergegangen ist.

Aufgrund des Klimawandels ist verschärfend zu beobachten, dass die gewachsenen Kanalnetze zunehmend mit intensiven und außergewöhnlichen Starkregen überlastet werden, welche nach der gültigen Statistik mit Regenhäufigkeiten bis einmal in 30 Jahren bzw. bis einmal in 100 Jahren eingeordnet werden. Sogar extreme Starkregen mit Regenhöhen, deren statistische Häufigkeiten deutlich seltener als einmal in 100 Jahren sind, wurden in den letzten Jahren verstärkt beobachtet; die Ereignisse in Dortmund (2008), Münster (2014), Hamburg und Wuppertal (2018) sind dafür prominente Beispiele. Eine der wesentlichen Herausforderungen der Zukunft für Städte und Kommunen werden daher Anpassungsmaßnahmen zur Stärkung der Resilienz gegen starkregenbedingte Überflutungen sein. In der Ingenieurpraxis sowie in der Entwicklung und Fortschreibung des technischen Regelwerks wird folgerichtig mit den Werkzeugen der Überflutungsgefahrenanalysen zunehmend das Abflussgeschehen von Starkregenereignissen jenseits der Bemessungshäufigkeiten von Kanalisationssystemen betrachtet.

Angesichts der großen Relevanz der dargestellten Sachverhalte ist es notwendig, eine genaue Kenntnis über die Erfassung und die Analyse der Einfluss- und Belastungsgröße "Niederschlag" zu besitzen, die zentrale Grundlage für alle planerischen und investiven Entscheidungen ist. Zurückblickend ist festzustellen, dass die systematische Einrichtung von Niederschlagsbeobachtungsstationen in den 1880er Jahren mit dem Bau der Kanalisationsnetze in den Städten zusammenfällt. Bis heute sind Regenschreiberbeobachtungen und die abgeleiteten statistischen Regengrößen Grundlage für die Bemessung von Kanalisationen. Bereits in den frühen Jahren wurden teilweise schreibende Regenmesser eingesetzt, in einzelnen Städten waren auch mehrere Stationen zur räumlichen Erfassung des Niederschlagsgeschehens eingerichtet. Erste systematische Zusammenstellungen der Niederschlagsbeobachtungen und Analysen finden sich u. a. bei HELLMANN (1906) oder HAEUSER (1919). Schon damals wird dort von extremen Regenereignissen berichtet: z. B. Berlin, 14. April 1902 mit 143 mm in 3,5 Stunden oder Adenau, 12. Juni 1910 mit 125,4 mm in 2,5 Stunden. Bis in die 1930er Jahre waren im damaligen Reichsgebiet 562 schreibende Regenmesser durch Städte und Wasserverbände installiert. Ein großer Entwicklungsschritt war die systematische Zusammenstellung und einheitliche Analyse dieser Beobachtungen, auf deren Grundlage Friedrich Reinhold 1940 die "Regenspenden in Deutschland" entwickelte.

Die Regenspenden in Verbindung mit dem abgeleiteten Zeitbeiwert waren bis Anfang der 1990er Jahre eine wichtige Bemessungsgrundlage für die Kanalnetze. Die Reinhold'schen Regenspenden wurden mit der Einführung der Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (KOSTRA 87) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Jahre 1990 abgelöst, deren fachliche Grundlage das heutige DWA-Arbeitsblatt A 531 ist. Die aktuelle Fortschreibung KOSTRA-DWD 2010R berücksichtigt den Analysezeitraum von 1951 bis 2010 für 98 schreibende Stationen sowie zusätzlich 150 Stationen mit Stundenwerten. Die KOSTRA-Werte liegen für regionalisiert auf einem Raster von 8,15 km x 8,20 km vor.

Die statistischen Regenhöhen aus KOSTRA oder die nach DWA-A 531 abgeleiteten statischen Regenhöhen für ortsspezifische Regenzeitreihen sind Eingangsgröße für klassische Bemessungsverfahren in der Siedlungsentwässerung, bei denen ein idealisierter Lastfall-Modellregen als Bemessungslastfall angenommen wird und Anlagen wie Kanalnetze dimensioniert werden. Die Bemessungshäufigkeit des Lastfalls entspricht damit der Versagenshäufigkeit.

Jedoch ist bekannt, dass nach dem Lastfallprinzip bemessene Systemkomponenten nur unzureichend die gestellten Anforderungen erfüllen. Die Ursache dafür liegt im Transformationsprozess vom Niederschlag zum Abfluss bzw. Wasserstand, der unter anderem den Anfangsbedingungen vor den Ereignissen unterliegt. Zudem werden die komplexen dynamischen Prozesse innerhalb vernetzter Systeme aus Kanalnetz und Regenwasserbewirtschaftungsanlagen durch das Lastfallprinzip nicht berücksichtigt. Eine zielgerichtete Bemessung der Anlagen bzw. der Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit entsprechend den realen Gegebenheiten ist nur möglich, wenn als Basis für die Niederschlag-Abfluss-Modelle lange kontinuierliche Niederschlagsreihen oder daraus abgeleitete Starkregenserien verwendet werden und die statistische Auswertung für die Zielgrößen erfolgt (Nachweisverfahren).

Unabhängig vom Lastfall- oder Nachweisverfahren besteht gemäß den technischen Regelwerken in der Stadtentwässerung die Anforderung, dass die der Bemessung zu Grunde liegenden Regenzeitreihen mindestens der dreifachen Länge der Wiederkehrzeit des Bemessungs- bzw. Nachweisziels entsprechen müssen. Für ein Bemessungsziel von einmal in 5 Jahren ist somit eine Zeitreihenlänge von mindestens 15 Jahren erforderlich; für den Nachweis der schadlosen Überflutung für ein Ereignis der Häufigkeit einmal in 30 Jahren somit eine Zeitreihenlänge von 90 Jahren.

In der Praxis sind langjährige und ortsgültige Regenzeitreihen mit einer erforderlichen zeitlichen Auflösung von mindestens 5 Minuten, die den Bemessungsanforderungen entsprechen, jedoch häufig nicht vorhanden; Aufzeichnungen der Vorkriegszeit sind in der Regel verloren gegangen; langjährige Aufzeichnungen der Nachkriegszeit liegen häufig nur für Großstädte vor, sind durch Wasserverbände erhoben oder bisher nicht systematisch erfasst und digitalisiert worden. Für den überwiegenden Anteil der nahezu 1.000 Regenschreiberstationen des DWD, welche in Echtzeit übertragen, wird eine Zeitreihenlänge in

einer Größenordnung von 20 Jahren bisher nicht überschritten. Im Ergebnis sind für eine überwältigende Mehrheit von kleinen und mittleren Kommunen keine langjährigen und ortsgültigen Zeitreihen verfügbar. In der Bemessungspraxis werden daher Regenzeitreihen benachbarter Stationen verwendet, deren eingeschränkte Ortsgültigkeit zu nicht optimalen Bemessungsergebnissen führen kann. Insgesamt ist anzunehmen, dass das erfasste und analysierte Regengeschehen auf Basis von Regenschreibermessungen nur einen Teil des realen Regengeschehens abbildet.

Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich, wenn die Punktinformation der Regenschreiberbeobachtung der räumlichen Information von Radarregendaten gegenübergestellt wird. Radarbeobachtungen sind durch den DWD ab dem Jahr 2001 für nahezu jeden Ortspunkt in Deutschland als kontinuierliche Daten in einer hohen zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Diskretisierung von 1°-Winkelschritt und 1 km Feldlänge in radialer Richtung verfügbar. Die Radardaten können, unter der Voraussetzung einer sorgfältigen Aufbereitung, insbesondere der Korrektur der Radarsignaldämpfung im konvektiven Starkregenereignisfall, das tatsächliche Regengeschehen in einer sehr guten qualitativen und quantitativen Übereinstimmung mit Regenschreiberbeobachtungen abbilden. Radardaten sind damit das ideale Werkzeug für die raumzeitliche Erfassung des Regengeschehens in Einzugsgebieten, welches der ursprünglichen Zielsetzung der Erfassung des Regengeschehens durch Regenschreiber entspricht.

Der in dieser HyWa-Ausgabe enthaltene Beitrag "Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland" stellt die Ergebnisse eines Forschungsprojektes vor, welches das Ziel hat, mithilfe von zwei unterschiedlichen Niederschlagsmodellen zeitlich hochaufgelöste synthetischen Niederschlagsdaten für ganz Deutschland bereitzustellen und deren Eignung für stadthydrologische Bemessungsaufgaben für Häufigkeiten bis einmal in 10 Jahren nachzuweisen. Der Beitrag zeigt, dass die synthetischen Zeitreihen das reale ortsspezifische Regengeschehen gut abbilden können und gegenüber dem Praxisszenario – der Verwendung einer benachbarten Station, wenn keine ortsgültigen Zeitreihen vorliegen – in Bezug auf den Fehler und die Unsicherheit überlegen sind. Die große Bedeutung der synthetischen Zeitreihen für die Ingenieurpraxis besteht auch darin, dass diese Zeitreihen für beliebige Ortspunkte in Deutschland erzeugt werden können. Sie schließen aus Sicht der Bemessungspraxis die Lücken im Regenschreiberbeobachtungsnetz.

*Dr. Stefan Krämer,  
Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH*

*Dipl.-Ing. Andreas Kuchenbecker,  
HAMBURG WASSER*

#### **Literaturverzeichnis**

- HAEUSER, J. (1919): Kurze starke Regenfälle in Bayern, ihre Ergiebigkeit, Dauer, Intensität, Häufigkeit und Ausdehnung. Abhandlungen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München.
- HELLMANN, G. (1906): Die Niederschläge in den Norddeutschen Stromgebieten. Herausgeber: D. Reimer, Berlin.
- REINHOLD, F. (1940): Regenspenden in Deutschland (Grundwerte für die Entwässerungstechnik). Archiv für Wasserwirtschaft des Reichverbandes der Deutschen Wasserwirtschaft; Nr. 56, Berlin.

Uwe Haberlandt, Stefan Krämer, András Bárdossy, Anne Bartens, Philipp Birkholz, Micha Eisele, Lothar Fuchs, Ole-Christian Herrmann, Andreas Kuchenbecker, Stefanie Maßmann, Ross Pidoto, Thomas Müller, Jochen Seidel & Klaus Sympher

# Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland

Continuous synthetic precipitation for Germany for design in urban hydrology

Der Beitrag präsentiert Ergebnisse eines Forschungsprojektes, welches sich mit der Untersuchung von Niederschlagsmodellen zur Erzeugung von synthetischen Niederschlagsdaten für stadthydrologische Anwendungen beschäftigt hat. Es werden zwei ausgewählte Niederschlagsmodelle vorgestellt und verglichen. Die Modelle wurden unter Verwendung der Daten von ungefähr 800 Niederschlagsstationen für ganz Deutschland regionalisiert und für 45 ausgewählte repräsentative Standorte über Statistiken von Niederschlag und simuliertem Abfluss in Kanalnetzen validiert. Die Ergebnisse zeigen die Überlegenheit der synthetischen Niederschläge im Vergleich zu einem Praxiszenario, welches immer die nächstgelegene verfügbare Station zur Datenlieferung verwendet. Die besten Ergebnisse liefert eine Mischung der Daten aus beiden Modellen, die zu einer Fehlerkompensation führt. Es werden Empfehlungen zur notwendigen Zeitreihenlänge für die praktische Bemessung gegeben. Die synthetischen Niederschläge stehen jetzt für beliebige Punkte in Deutschland auf einer Webplattform für die wasserwirtschaftliche Praxis zur Verfügung.

**Schlagwörter:** Niederschlagsmodell, synthetische Niederschlagsdaten, Urbanhydrologie

Results from a research project are presented, dealing with the analyses of precipitation models for the generation of stochastic rainfall for urban hydrology. Two selected rainfall models are presented and compared. The models are regionalised for Germany using data from about 800 rainfall stations. They are validated on a representative subset of 45 stations based on precipitation statistics and simulated discharge in sewer systems. The results show the superiority of synthetic rainfall compared to a practice scenario where the nearest neighbour station always serves as data provider for the target location. The best results are reached using a mixture of data from both stochastic rainfall models leading to a compensation of errors. Recommendations for the required time series length for practical design are given. The synthetic rainfall data are now available on a web platform for practical applications for any location in Germany.

**Keywords:** Precipitation model, synthetic precipitation data, urban hydrology

## 1 Einführung

Für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen mittels mathematischer Simulationsmodelle werden lange kontinuierliche, zeitlich hoch aufgelöste Reihen des Niederschlages benötigt. Beobachtungsdaten stehen gewöhnlich nur in unzureichendem Maße zur Verfügung, häufig in einer zu kurzen Länge und vor allem an zu wenigen Orten. Auf Basis der beobachteten Daten können jedoch synthetische Niederschlagszeitreihen in beliebiger Länge und für unbeobachtete Orte erzeugt werden, welche die örtlichen Besonderheiten des Niederschlagsverhaltens gut nachbilden und daher eine bessere Planungsgrundlage sind (MÜLLER et al., 2018; CALLAU & HABERLANDT, 2017). Ziel der vorliegenden Untersuchungen war zunächst die Weiterentwicklung von Niederschlagsmodellen sowie die Eignungsprüfung der mit diesen Modellen erzeugten synthetischen Zeitreihen als Bemessungsgrundlage für die Stadtentwässerung. Ein weiteres Ziel ist die Bereitstellung der synthetischen Niederschlagszeitreihen auf einem Raster von 1 km x 1 km flächendeckend für Deutschland. Diese Untersuchungen wurden innerhalb des Forschungsprojektes "Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung und den Betrieb von Stadtentwässerungssystemen – SYNOPSIS" durchgeführt, über dessen Ergebnisse hier auszugsweise berichtet wird (HABERLANDT et al., 2020).

Stochastische Niederschlagsmodelle werden seit langem zur Lösung der verschiedensten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen herangezogen. Einen Überblick

zu den verschiedenen Typen von Niederschlagsmodellen geben zum Beispiel ONOF (2000) oder HABERLANDT (2011). Die Niederschlagsmodelle werden gewöhnlich spezifisch für bestimmte Anwendungen entwickelt. Für die Anwendung in der Stadthydrologie sind Modelle notwendig, die kontinuierliche Zeitreihen mit einer zeitlichen Mindestauflösung von 5 Minuten liefern (ARNBJERG-NIELSEN, 2012; COWPERTWAIT, 2010; LICZNAR et al., 2015; PARK et al., 2021).

Im vorliegenden Fall geht es bei den stadthydrologischen Anwendungen einerseits um die hydraulische Leistungsfähigkeit am Beispiel der Nachweisgröße "Überstau" (Überstaunachweis) nach DWA-A 118 (2006) und andererseits um die hydrologische "Schmutzfracht-Berechnung" (DWA-A 102, 2020). Diese unterschiedlichen Anwendungsziele verlangen Niederschlagsmodelle, die sowohl Extremwerte als auch die Niederschlagskontinua gut abbilden können. Es können allerdings Abstriche bei der Nachbildung der räumlichen Niederschlagsverteilung gemacht werden, da nur die langjährige Statistik bemessungsrelevant ist. Zudem werden vergleichsweise kleine Gebiete betrachtet, da die Verwendung der synthetischen Zeitreihen auf kleine bis mittelgroße Siedlungsgebiete bzw. Städte zielt, da diese im Gegensatz zu Betreibern großstädtischer Entwässerungssysteme häufig nicht über eigene Niederschlagsmessstationen verfügen.

Im Kapitel 2 werden zunächst das Vorgehen und die Methodik näher erläutert. Das Kapitel 3 geht auf die verwendeten Modelle

und Daten ein. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse präsentiert, welche die Validierung anhand des Niederschlags und anhand simulierter Abflüsse betreffen. Das Kapitel 5 beinhaltet Mapping, Datenbereitstellung und Unsicherheiten. Im Kapitel 6 werden Empfehlungen für die Zeitreihenlänge gegeben und im Kapitel 7 Schlussfolgerungen gezogen.

## 2 Methodik

Das grundlegende Vorgehen für die Erzeugung, Analyse und Bereitstellung der synthetischen Niederschläge lässt sich in sechs Schritte einteilen:

1. Auswahl und (Weiter-) Entwicklung der Niederschlagsmodelle anhand beobachteter Orte
2. Regionalisierung der Modelle für ausgewählte, unbeobachtete Orte des Niederschlags
3. Niederschlagsseitige Validierung der Modelle bzw. synthetischen Zeitreihen anhand beobachteter Niederschläge für ausgewählte Referenzstandorte
4. Abflusseitige Validierung für den hydraulischen Überstau nachweis für ausgewählte Referenzstandorte und benachbarte Standorte
5. Abflusseitige Validierung für die hydrologische Schmutzfracht-Berechnung für ausgewählte Referenzstandorte und benachbarte Standorte
6. Regionalisierung der Niederschlagsmodelle auf ein Raster von 1 km x 1 km für Deutschland

Die Weiterentwicklung der Niederschlagsmodelle (Schritte 1 und 2) wurde teilweise iterativ bzw. mehrfach ausgeführt, solange bis die abflusseitige Validierung (Schritte 4 und 5) zufriedenstellende Ergebnisse geliefert hat.

### 2.1 Niederschlagsbelastungen für die Validierung

Für die niederschlags- und abflusseitige Validierung wurden jeweils folgende Niederschlagsszenarien einbezogen:

- A. Referenz: beobachteter langjähriger Niederschlag am Ort (Zeitreihenlänge: 20 a),
- B. Synthetischer Niederschlag von Niederschlagsmodellen:
  - i) B-WAWI: Modell der Leibniz Uni Hannover (Zeitreihenlänge: 300 a),
  - ii) B-LHG: Modell der Uni Stuttgart (Zeitreihenlänge: 300 a),
  - iii) B-Mixed: Gemischte Daten der Modelle von WAWI & LHG (Zeitreihenlänge: 300 a),
- C. Praxiszenario: Niederschlag von der nächstgelegenen Beobachtungsstation des DWD (Zeitreihenlänge: 10 bis 20 a).

Für die Validierung wird eine Stichprobe von Orten mit langen Niederschlagsbeobachtungen (20 a) ausgewählt (Kap. 3). Diese werden als Referenz (Szenario A) betrachtet.

Mithilfe der beiden Modelle WAWI und LHG werden jeweils 300 Jahre synthetische Niederschlagsdaten erzeugt und geprüft;

dazu gehört auch ein Mixed-Datensatz, der jeweils 150 Jahre der Modelle WAWI und LHG im Jahreswechsel umfasst (Szenario B).

Außerdem wird ein sogenanntes "Praxiszenario" (C) untersucht, für das jeweils die dem Validierungspunkt nächstbenachbarte DWD-Station zur Bemessung verwendet wird. Dieses Vorgehen entspricht der Praxis, wenn keine ortsgültigen Niederschlagsbeobachtungen verfügbar sind. Dieses Verfahren impliziert natürlich teilweise erhebliche Unsicherheiten in Abhängigkeit vom Abstand der Praxisstation zum Ort der Bemessung, in Abhängigkeit von der Zeitreihenlänge und dem gewünschten Wiederkehrintervall (Kap. 6). Für die Validierung der synthetischen Zeitreihen erfolgt eine räumliche Aufteilung in Stichproben (Splitsampling). Der Gesamtdatensatz an Stationen (950 Stück) wird aufgeteilt in eine größere Schätzstichprobe zur Ermittlung der Parameter der Niederschlagsmodelle und eine kleinere Validierungsstichprobe (45 Referenzstationen, Kap. 3). Die Validierungsstichprobe dient der Überprüfung der Modellgüte; die Daten dieser Stichprobe wurden nicht für die Parameterschätzung oder Regionalisierung der Niederschlagsmodelle verwendet. Dieses Splitsampling wurde konsequent für alle Validierungsstufen (Niederschlag, Schmutzfracht und Überstauverhalten) angewendet.

### 2.2 Zielgrößen

Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von wichtigen Zielkriterien, die für die Validierung der synthetischen Zeitreihen genutzt wurden.

Für die Auswertung wurden die simulierten Zielkriterien aus den Szenarien B und C mit den Kriterien aus dem Referenzszenario A grafisch und unter Verwendung verschiedener Fehlermaße verglichen. Folgende Fehlermaße werden für die Vergleiche im Kapitel 4 verwendet:

prozentualer systematischer Fehler (percent Bias)

$$pBIAS [\%] = \frac{z_i^* - z_i}{z_i} \cdot 100 \tag{1}$$

absoluter Standardfehler (Root Mean Squared Error)

$$RMSE [-] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i^* - z_i)^2} \tag{2}$$

<b>Tabelle 1</b>	
Zielkriterien für die Validierung der synthetischen Zeitreihen. <i>Performance criteria for the validation of the synthetic time series.</i>	
<b>Niederschlag</b>	
1.	Jahressumme NJ [mm/a]
2.	Ereignisvolumen EV, -intensität EI, -dauer ED [mm, mm/h, d]
3.	Trockendauer TD [d]
4.	Extremwertquantile für verschiedene Dauerstufen PQ [mm]
<b>Hydrodynamische Kanalnetzberechnung (hydraulische Leistungsfähigkeit, DWA-A 118)</b>	
1.	Überstauvolumen $V_{\bar{u}}$ [m <sup>3</sup> ]
2.	Überstauwiederkehrzeit $T_{\bar{u}}$ [a]
<b>Schmutzfracht-Berechnung (DWA-A 102)</b>	
1.	Anzahl der Überlaufereignisse $n_{ue}$ [1/a]
2.	Überlaufvolumen $V_{Que}$ [m <sup>3</sup> ]
3.	Überlaufdauer $T_{ue}$ [d]

relativer Standardfehler (relative Root Mean Squared Error)

$$rRMSE [-] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{z_i^* - z_i}{z_i} \right)^2} \quad (3)$$

Die Größe  $z_i$  beschreibt jeweils das Referenzkriterium (Szenario A) und  $z_i^*$  jeweils das simulierte Kriterium (Szenarien B oder C). Für eine gute Modellgüte sollten der pBias nahe Null und der RMSE bzw. der rRMSE möglichst klein sein.

Zur Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Simulation von Überstau, resultierend aus den kurzen Beobachtungsreihen, wird für die abflusseitige Validierung eine zusätzliche Maßzahl PERC eingeführt. Sie beschreibt den Anteil der Schächte mit der geschätzten Überstauwiederkehrzeit auf Grundlage der synthetischen Zeitreihen ( $z_i^*$ ), die innerhalb des geschätzten Vertrauensbereiches der Überstauwiederkehrzeiten auf Basis der Referenzzeitreihe liegen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Schächte mit Überstau ( $z_i$ ). Der Vertrauensbereich des Überstauverhaltens der Schächte wurde auf Basis der Referenzzeitreihe mithilfe eines Bootstrap-Verfahrens geschätzt. Die Zielgröße PERC ist somit eine Maßzahl für die Übereinstimmung der simulierten Werte mit dem Vertrauensbereich aus der Beobachtung und wird als Prozentwert angegeben.

$$PERC = \frac{z_i^*}{z_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Die Validierung der synthetischen Niederschläge erfolgt zunächst durch Vergleich mit beobachteten Niederschlägen (Schritt 3) für charakteristische Niederschlagsgrößen und anschließend durch Vergleich von Nachweisgrößen für die Kanalnetzbemessung, die auf der Basis synthetischer und beobachteter Niederschläge simuliert wurden (Schritt 6).

### 3 Modelle und Eingangsdaten

Nach umfangreichem Testen verschiedener Niederschlagsmodelle (HABERLANDT et al., 2020) wurden zwei Modelle, eines der Universität Hannover (WAWI) und eines der Universität Stuttgart (LHG), für die weiteren Berechnungen und die Regionalisierung für das Untersuchungsgebiet Deutschland ausgewählt (Schritt 1). Beide Modelle werden im Folgenden kurz beschrieben.

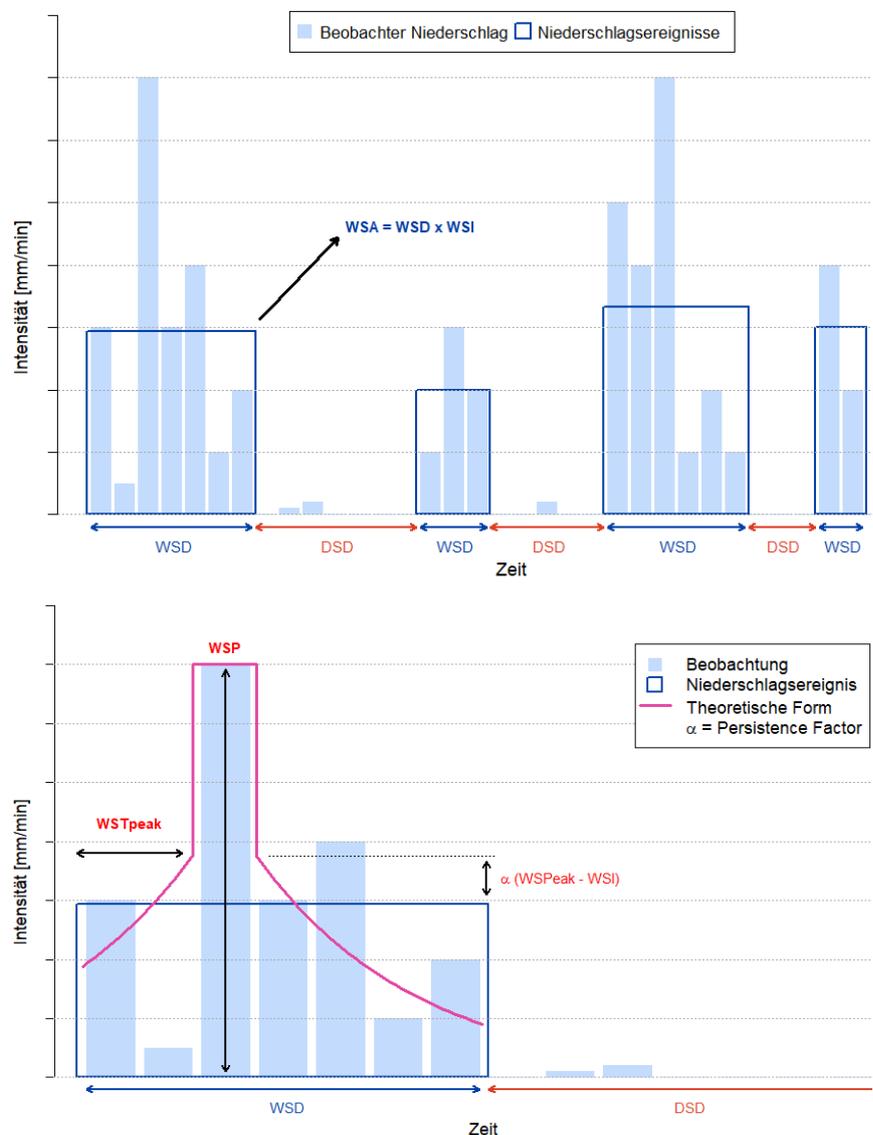
#### 3.1 Niederschlagsmodelle

##### 3.1.1 Parametrisches Modell der Leibniz Universität Hannover (WAWI)

Das Modell der Universität Hannover ist ein parametrisches ereignisbasiertes Modell. Eine detaillierte Beschreibung kann CALLAU PODUJE & HABERLANDT (2017) entnommen werden. Der Niederschlag wird in dieser Version des Modells jeweils univariat für jeden gewünschten Zielpunkt modelliert. Das Niederschlagsmodell beruht auf der Theorie

der Alternating-Renewal-Prozesse. Der Niederschlag wird durch zwei Strukturen vollständig beschrieben: die äußere und die innere. Die äußere Struktur ist die Abfolge von unabhängigen Regenereignissen, die durch Nass- und Trockenperioden sowie die Gesamtregenmenge innerhalb der Nassperiode beschrieben werden. Die innere Struktur dagegen beschreibt die zeitliche Verteilung der Gesamtregenmenge innerhalb der Nassperiode (Abb. 1). Die Niederschlagsereignisse werden aus einer kontinuierlichen Zeitreihe abgeleitet. Es werden Schwellenwerte zur Definition der Ereignisse festgelegt. Marginale Ereignisse werden zunächst ausgeschlossen, jedoch nach Generierung der äußeren Struktur über ein Random-Resampling aus den Beobachtungen wieder hinzugefügt.

Für die äußere Struktur werden Kappa-Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die Ereignischarakteristika Nassdauer (WSD), Trockendauer (DSD) und Ereignisvolumen (WSA) angepasst.



**Abbildung 1**  
Äußere Struktur (oberes Bild) und innere Struktur (unteres Bild) des Niederschlagprozesses im WAWI-Niederschlagsmodell.  
External structure (upper panel) and internal structure (lower panel) of precipitation process for the WAWI precipitation model.

Abhängigkeiten zwischen WSD und WSA werden über empirische Copulas berücksichtigt. Für die innere Struktur werden die Ereignisse in 5-Minuten-Intervalle zerlegt. Die Ereignisspitze (WSPeak) wird aus einer Normalverteilung bedingt an die mittlere Intensität (WSI) über eine Normal-Copula geschätzt. Der Eintrittszeitpunkt der Intensitätsspitze (WSTpeak) wird aus einer Gleichverteilung gezogen, und es wird ein exponentiell abnehmender Verlauf um die Spitze angenommen. Die Modellparameter werden getrennt für Sommer und Winter auf Basis der L-Momente bestimmt.

Die Regionalisierung des Modells auf ein Raster von 1 km x 1 km für Deutschland erfolgt mithilfe von External-Drift-Kriging der L-Momente für die Ereignisvariablen unter Nutzung von Gebiets- und mittleren Klimaeinflussgrößen wie z. B. Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Ortskoordinaten, Höhenlage u. a. (HABERLANDT et al., 2010).

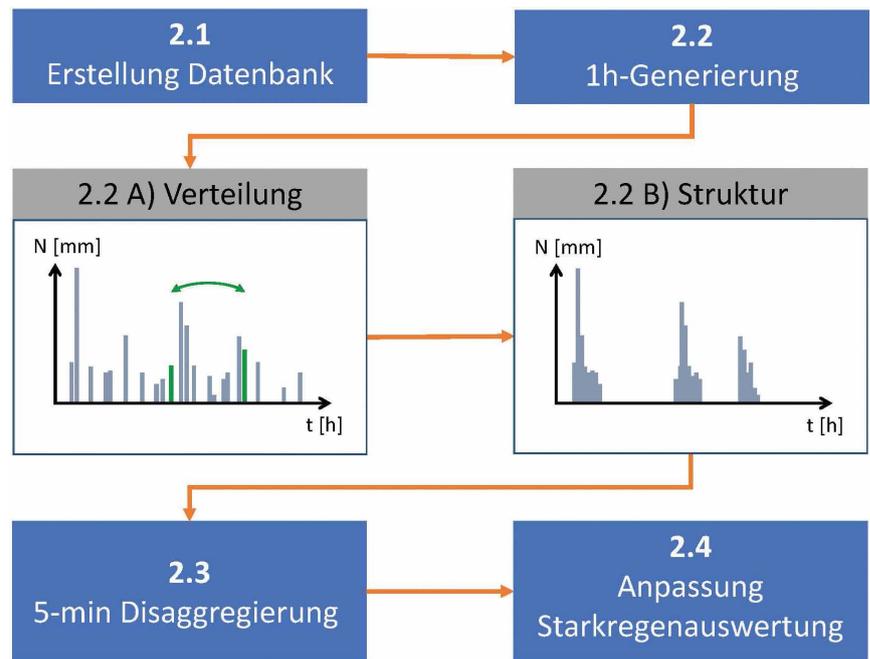
### 3.1.2 Nicht-parametrisches Modell der Universität Stuttgart (LHG)

Das Modell der Universität Stuttgart (LHG) ist ein nicht-parametrisches Modell, welches im Kern auf Simulated Annealing, einer diskreten nicht-linearen Optimierung beruht (BÁRDOSSY, 1998) und bereits als NiedSim-Verfahren bekannt ist (MÜLLER et al., 2018). Der Niederschlag wird in dieser Version ebenfalls nur für Einzelpunkte erzeugt. Die Abbildung 2 schematisiert den Programmablauf dieses Modells. Zunächst werden relevante Niederschlagscharakteristika wie Jahressummen, Monatssummen, Extremwerte, Autokorrelation usw. aus Stationsdaten abgeleitet und mit External-Drift-Kriging auf ein Raster von 1 km x 1 km interpoliert (2.1 Erstellung Datenbank). Dann erfolgt für jeden relevanten Punkt eine Generierung von zeitlich ungeordneten Stundenwerten aus empirischen Verteilungsfunktionen (2.2 A Verteilung). Die zufälligen stündlichen Verteilungen werden nun mithilfe von Simulated Annealing so optimiert, dass Autokorrelation, Clusterung und andere wesentliche Charakteristika aufgeprägt werden (2.2 B Struktur). Im nächsten Schritt werden die Stundenwerte wiederum mit Simulated Annealing in 5-Minuten-Werte zeitlich disaggregiert (2.3). Abschließend werden die simulierten Niederschlagswerte anhand vorgegebener Starkregenstatistiken weiter optimiert (2.4). Die Regionalisierung des Modells ist a priori über den ersten Schritt der Bereitstellung der Niederschlagscharakteristika flächendeckend auf einem Raster bereits erfolgt.

Für weitere Details wird auf MÜLLER et al. (2018) und HABERLANDT et al. (2020) verwiesen.

### 3.2 Niederschlag-Abfluss-Modelle

Zur objektiven Überprüfung der synthetischen Niederschläge wurden neben der niederschlagsseitigen Validierung Kanalnetzrechnungen entsprechend der Schritte 4 und 5 (Kap. 2) durchgeführt. Es wird grundsätzlich zwischen hydrodynamischen und hydrologischen Kanalnetzmodellen unterschieden. Erstere werden mit dem Ziel eingesetzt, die hydraulische Leis-



**Abbildung 2**

Schematische Übersicht zum Programmablauf im LHG-Niederschlagsmodell.  
*Scheme of the procedures in the LHG precipitation model.*

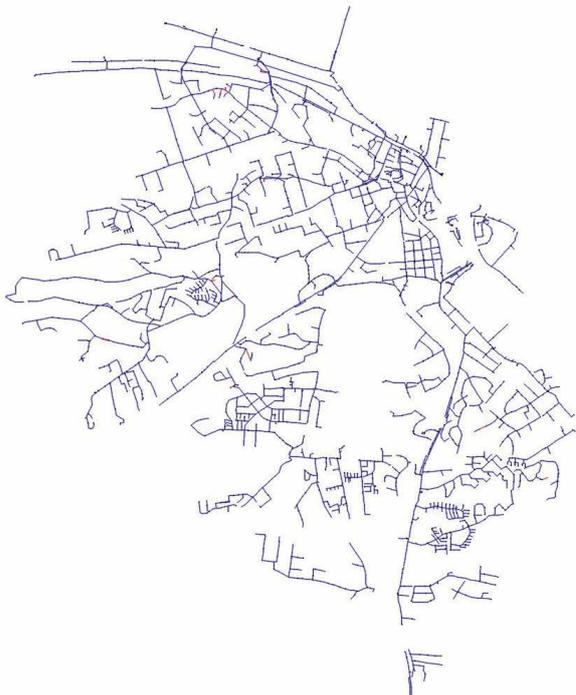
tungsfähigkeit von Entwässerungssystemen nachzuweisen, das heißt die Haltungsquerschnitte zu dimensionieren. Letztere werden verwendet, um das langzeitliche Entlastungsverhalten von Regen- und Mischwasserbauwerken zu bilanzieren und Schmutzfracht-Berechnungen zu ermöglichen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden die hydrodynamischen Modelle HYSTEM EXTRAN (ITWH, 2018a) und ++SYSTEMS (Tandler.com, 2018) verwendet. Für die Schmutzfracht-Berechnungen wurde das hydrologische Modell KOSIM (ITWH, 2018b) genutzt.

Die Kanalnetzrechnungen wurden für alle 45 Referenz- bzw. Validierungsstandorte durchgeführt. Dafür wurden zwei modelltechnische Ersatzsysteme, jeweils eins für die hydraulischen Berechnungen und eins für die Schmutzfracht-Berechnungen, entsprechend der verwendeten Simulationssoftware implementiert. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Ersatzsysteme und listen deren wesentliche Systemeigenschaften auf.

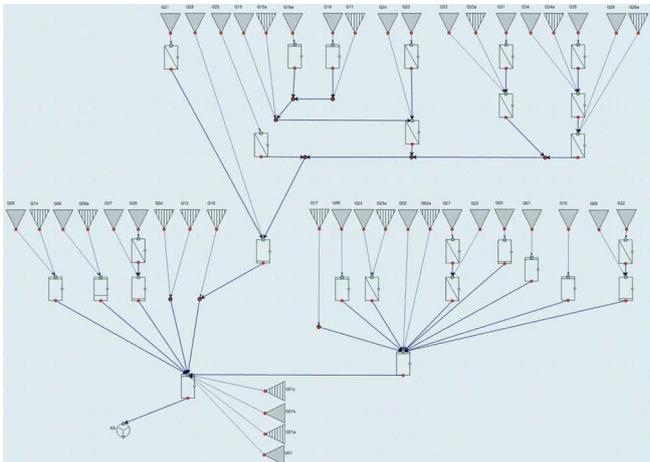
Den Ersatzsystemen liegen reale Entwässerungssysteme zugrunde. Die Auswahl der Entwässerungssysteme erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer weitgehend umfassenden Abbildung deutschlandweit typischer Systemcharakteristiken. Diese Ersatzsysteme wurden anschließend für alle Validierungsstandorte unter Berücksichtigung der lokalen Topographie und Niederschlagscharakteristik hinsichtlich ihrer relevanten Systemgrößen (angeschlossene, abflusswirksame Flächen, Speichergrößen bzw. -flächen) angepasst (HABERLANDT et al., 2020).

### 3.3 Niederschlagsdaten

Das betrachtete Untersuchungsgebiet ist ganz Deutschland. Als Primärdaten für die Entwicklung der Niederschlagsmodelle stehen insgesamt 950 Stationen mit einer zeitlichen Auflösung

<p><b>Reales System</b></p> <p>Teilnetze: 36                  Kanalnetzlänge: 158 km                  Fließzeiten der Teilnetze: 5 min bis 90 min                  Abflusswirksame Flächen: 534 ha                  Haltungsverhältnisse: -9,2 % bis 42,8 %                  Längengewichtetes Mittel: 2,1 %                  Schachtsöhle: 180 bis 261 m ü. NN                  Verschiedene Profile: Kreis-, Ei- und Drachenprofil</p>	
<p><b>Modelltechnisches Ersatzsystem</b></p> <p>Systemelemente: 8.277                  Transportelemente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Haltungen: 4.148                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pumpen: 3</li> <li>• Wehre: 2</li> </ul> </li> <li>• Schachtelemente                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schächte: 4.030</li> <li>• Speicherschächte: 25</li> <li>• Auslässe: 69</li> </ul> </li> </ul>	

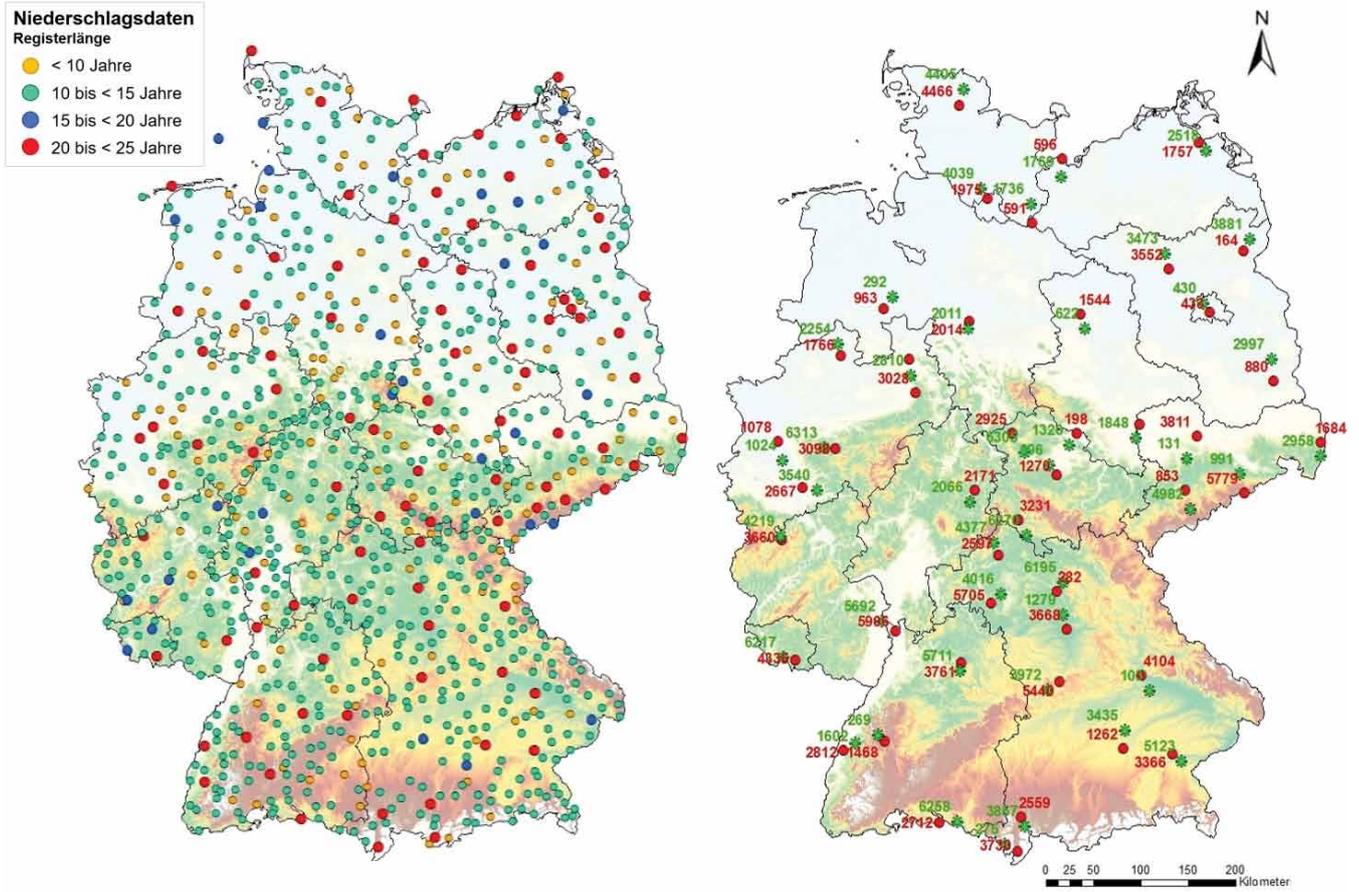
**Abbildung 3**  
 Synthetisches Kanalnetz für die hydraulischen Berechnungen mit HYSTEM-EXTRAN und ++SYSTEMS.  
*Synthetic network for hydraulic simulations using HYSTEM-EXTRAN and ++SYSTEMS.*

<p>Netzelemente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 Regenüberlaufbecken mit 146 m<sup>3</sup> bis 7.208 m<sup>3</sup></li> <li>• 4 Stauraumkanäle mit 131 m<sup>3</sup> bis 925 m<sup>3</sup></li> <li>• 10 Regenrückhaltbecken</li> <li>• 14 Regenüberläufe</li> <li>• 14 Pumpwerke</li> <li>• 4 Hochwasserpumpwerke</li> <li>• Kläranale mit 935 l/s Trockenwetterabfluss</li> </ul> <p>Höhenlage: 95 mNN bis 220 mNN                  Kanalnetzlänge: 158 km                  Druckleitungen: 80 km                  Freispiegelleitungen: 287 km                  Fläche: 11,6 km<sup>2</sup></p>	
---	--

**Abbildung 4**  
 Synthetisches Kanalnetz für die Schmutzfracht-Berechnung mit KOSIM.  
*Synthetic network for pollution load simulations using KOSIM.*

von 1 Minute mit unterschiedlichen Beobachtungsdauern (Abb. 5, links) und sämtliche Tagesstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung. Im LHG-Modell werden in Abhängigkeit der zu ermittelnden Niederschlagscharakteristik entweder nur die registrierenden Stationen oder zusätzlich die Tagesstationen verwendet. Dabei wird die unterschiedliche Zeitreihenlänge gewichtet berücksichtigt (MÜLLER et al., 2018).

Im WAWI-Modell werden nur registrierende Stationen mit einer Beobachtungslänge größer als 10 Jahre (803 Stationen) für die Parameterschätzung genutzt. Für die Validierung wurden ca. 5 % der verfügbaren Stationen (45 von 803) als Referenzstationen ausgewählt (Abb. 5 rechts). Entscheidungskriterien für diese Auswahl waren die Qualität und Kontinuität sowie die zeitliche Parallelität der verfügbaren Daten. Alle ausgewählten Referenz-

**Abbildung 5**

Linkes Bild: Verwendete registrierende Niederschlagsstationen des DWD. Rechtes Bild: Referenzstationen für Validierung (rot) und Praxisstationen (grün).  
Left panel: Utilised recording precipitation stations of the DWD. Right panel: reference stations for validation (red) and practice stations (green).

stationen sollten zeitlich parallel über den Zeitraum 1998 bis 2017 (20 Jahre) ohne größere Ausfallzeiträume gemessen haben. Ergänzend wurde darauf geachtet, dass die Referenzstationen möglichst repräsentativ sind unter Berücksichtigung der Lage, des Klimas, der Orographie und der Verteilung im Bundesgebiet. Diese 45 Referenzstationen wurden nicht für die Erzeugung der synthetischen Zeitreihen mit den Niederschlagsmodellen verwendet. Diese Vorgehensweise wurde konsequent für alle Validierungen (Niederschlag, Überstaunachweis und Schmutzfracht-Berechnung) angewendet.

Für das Praxisszenario (C) wird die jeweils nächstgelegene Station zum Ort der Untersuchung verwendet. Deshalb wurden außerdem die 45 zu den Referenzstationen nächstgelegenen DWD Stationen selektiert (Praxisstationen, Abb. 5 rechts). Die Entfernungen der Praxisstationen zu den Referenzstationen variiert zwischen 4 km und 26 km. Die Beobachtungsdauer ist für alle Praxisstationen größer als 10 Jahre.

## 4 Ergebnisse

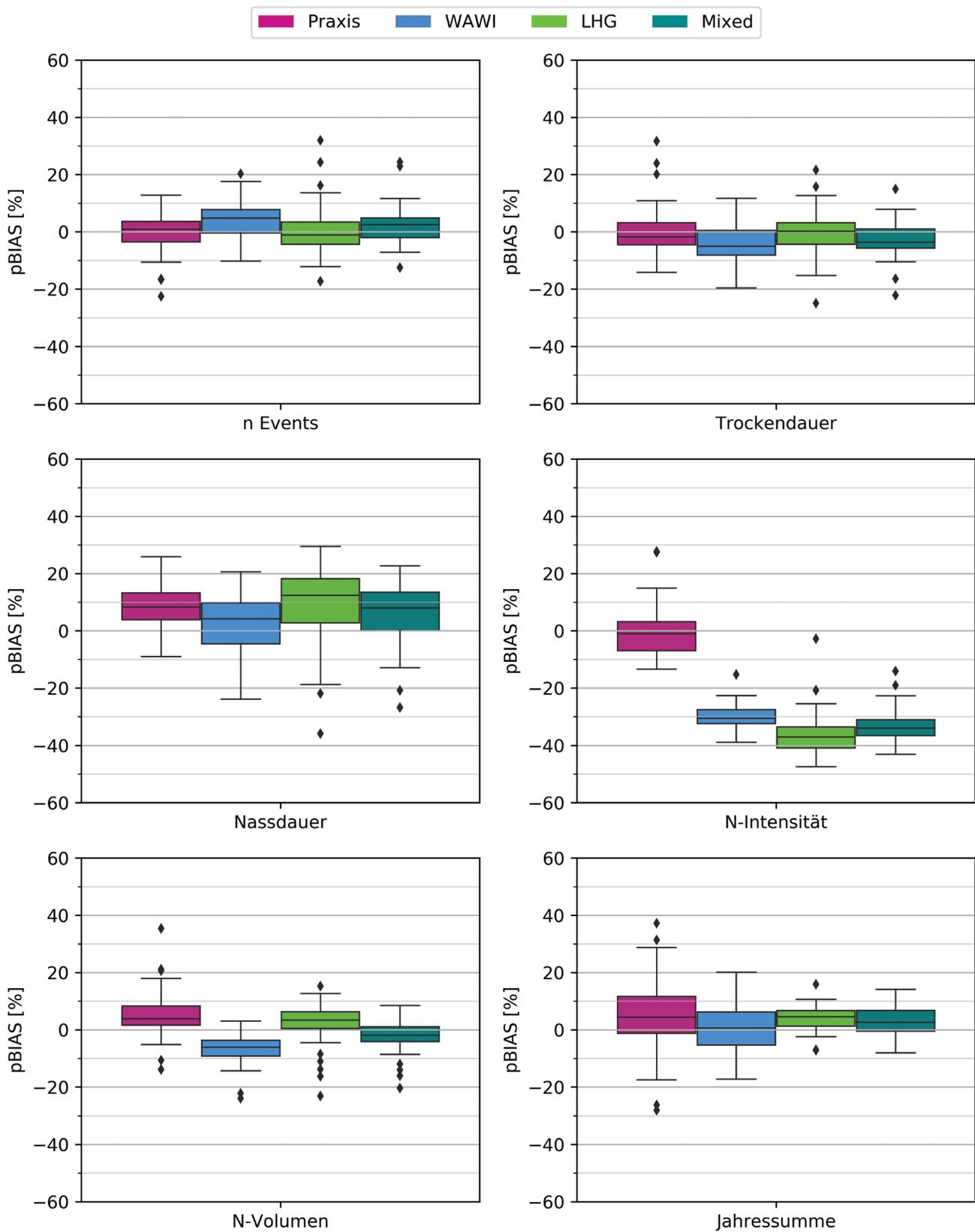
### 4.1 Niederschlagsseitige Validierung

Vor ihrer Verwendung in der Kanalnetzmodellierung werden zunächst die synthetisch generierten Zeitreihen der beiden Nie-

derschlagsmodelle miteinander verglichen (Szenarios B-WAWI, B-LHG, 300 a jeweils). Außerdem wurde eine Mischzeitreihe beider Modelle evaluiert (Szenario B-MIXED, 150 a von jedem Modell). Für den Vergleich wurde eine Vielzahl von Niederschlagscharakteristiken verwendet, wobei hier nur über die in der Tabelle 1 aufgelisteten Vergleichskriterien berichtet wird (für mehr Details siehe HABERLANDT et al., 2020). Dabei kann zwischen ereignisbasierten Kriterien und Extremwertkriterien unterschieden werden. Eine möglichst adäquate Nachbildung Ersterer ist insbesondere für die Schmutzfracht-Berechnung und die gute Nachbildung Letzterer für die Kanalnetzdimensionierung relevant. Die Abbildung 6 zeigt den systematischen Fehler für die ereignisbasierten Kriterien.

Bis auf die Niederschlagsintensität, welche deutlich unterschätzt wird, liefern die stochastischen Modelle Niederschlagswerte mit vergleichbaren oder geringeren Fehlern als die aus dem Praxisszenario. Außerdem zeigt sich, dass die beiden Modelle teilweise Abweichungen in unterschiedliche Richtungen haben, welche durch Mischung der Daten kompensiert werden können. Dies betrifft zum Beispiel das Niederschlagsvolumen der Ereignisse.

Zur Evaluation der Extremwerteigenschaften wurden die Zeitreihen auf Basis partieller Serien nach DWA-A531 (2012) extrem-



**Abbildung 6**

Boxplots des prozentualen systematischen Fehlers für verschiedene Ereigniskriterien und die Jahresniederschlagssumme für die Niederschlagsmodelle (Szenarien B-WAWI, B-LHG und B-MIXED) und das Praxisszenario (C) für die 45 Validierungsstationen.

Box plots for the percentage bias for different events properties and the annual rainfall for the rainfall models (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) and the practice scenario (C) for the 45 validation stations.

**Tabelle 2**  
Mittlerer relativer Standardfehler (rMSE) der geschätzten Starkniederschläge für verschiedene Dauerstufen und Wiederkehrzeiten für das Praxisszenario (C) und die synthetischen Zeitreihen (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) für die 45 Validierungsstationen. Die jeweils geringsten Fehler pro Dauerstufe und Wiederkehrintervall sind grau hervorgehoben.  
Mean relative standard error of the estimated heavy precipitation for different durations and return periods for the practical scenario (C) and the synthetic time series (B-WAWI, B-LHG, B-MIXED) for the 45 validation stations. The smallest error for each duration and return period is highlighted in grey.

rMSE [-]		Dauer [min]	5	15	30	60	180
Wiederkehrzeit [Jahre]	2	Praxis	0,15	0,18	0,18	0,18	0,17
		WAWI	0,14	0,18	0,16	0,15	0,12
		LHG	0,12	0,12	0,12	0,12	0,09
		Mixed	0,12	0,13	0,11	0,12	0,09
	5	Praxis	0,19	0,23	0,23	0,26	0,23
		WAWI	0,12	0,19	0,18	0,16	0,16
		LHG	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
		Mixed	0,10	0,14	0,14	0,14	0,13
	10	Praxis	0,20	0,25	0,23	0,28	0,26
		WAWI	0,14	0,17	0,19	0,18	0,19
		LHG	0,14	0,15	0,19	0,20	0,18
		Mixed	0,12	0,15	0,18	0,18	0,16
	20	Praxis	0,27	0,33	0,37	0,36	0,39
		WAWI	0,18	0,18	0,21	0,21	0,28
		LHG	0,18	0,19	0,22	0,20	0,21
		Mixed	0,16	0,18	0,21	0,19	0,21

wertstatistisch analysiert. Die Ergebnisse hinsichtlich der relativen Standardfehler rMSE sind in Tabelle 2 dargestellt. Beide Modelle (B-WAWI und B-LHG) liefern in der Regel kleinere Fehler als das Praxisszenario (C), wobei das LHG-Modell hier besser als das WAWI-Modell abschneidet. Eine Kombination der Daten aus beiden Modellen ist hier besonders vorteilhaft und liefert teilweise kleinere Fehler als jedes einzelne Modell für sich. Dies könnte mit einer besseren Anpassung der Verteilungsfunktionen an die Mischdaten erklärt werden.

Abbildung 7 zeigt ergänzend einen Vergleich des systematischen Fehlers zwischen Praxisszenario (C) und Mischszenario (B-MIXED) dieser extremwertstatistischen Auswertung. Die Fehlerspannweite für das Mischszenario ist immer kleiner als die des Praxisszenarios. Für kurze Dauerstufen (bis  $D = 30$  min) zeigt sich eine leichte Unterschätzung der Extremwerte durch die Niederschlagsmodelle, für längere Dauerstufen verschwindet diese jedoch.

Zusammenfassend kann aus der niederschlagsseitigen Validierung geschlossen werden, dass beide Niederschlagsmodelle gute Ergebnisse hinsichtlich der Nachbildung der Niederschlagscharakteristiken erzielen. Bei der Gegenüberstellung der synthetisch generierten Zeitreihen mit den beobachteten des Praxisszenarios erreichen die Niederschlagsmodelle größtenteils vergleichbare oder bessere Ergebnisse. Vor allem bei der Abbildung der Extremwerte, die für die Kanalnetzmodellierung von besonderer Bedeutung sind, zeigen die synthetischen Reihen durchweg geringere Abweichungen bei einer kleineren Streubreite. Das Mischszenario, welches Daten beider Niederschlagsmodelle verwendet, schneidet insgesamt am besten ab. Eine abschließende Beurteilung hinsichtlich der Güte der gemischten synthetischen Niederschlagszeitreihen ist

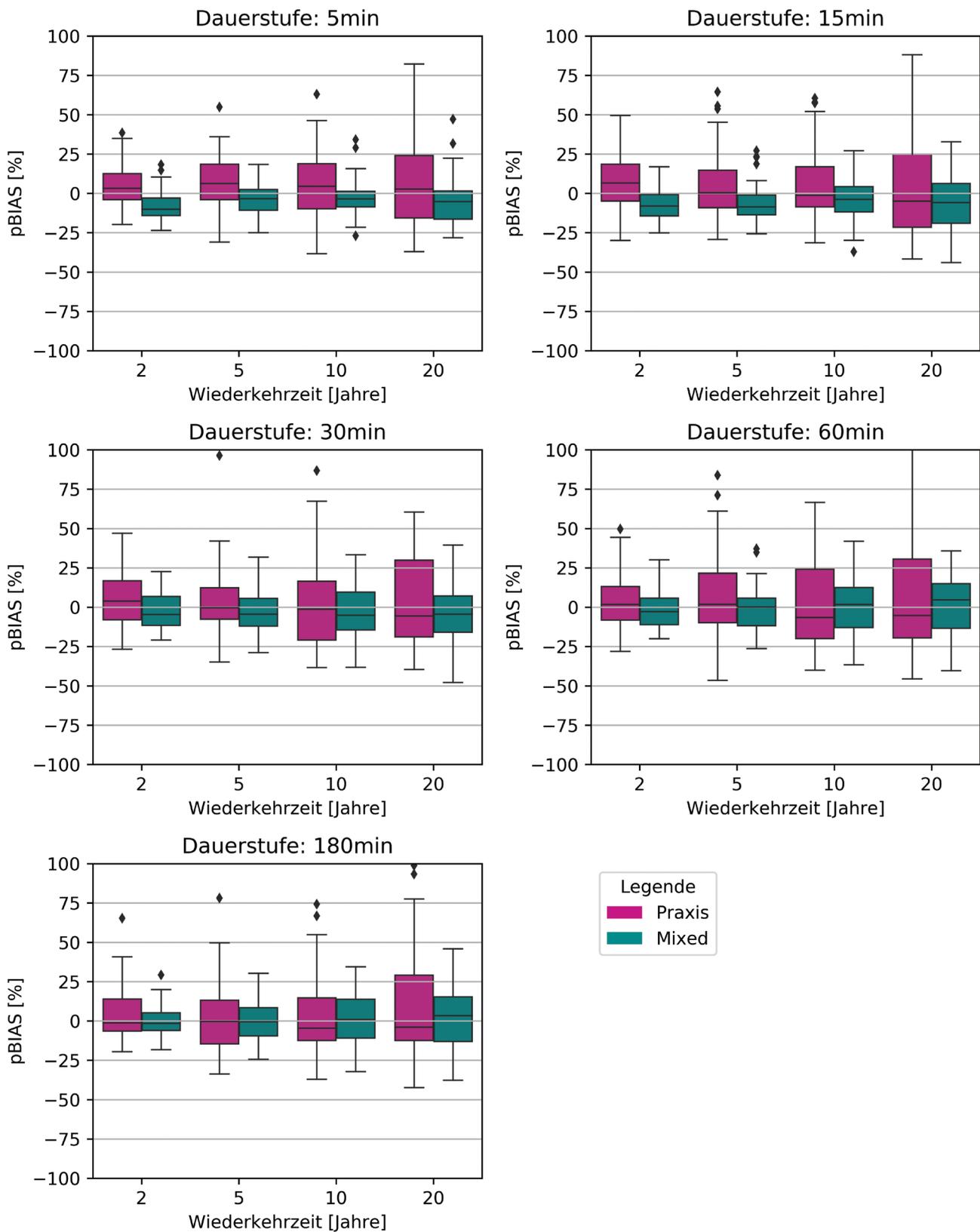
nur mittels urbanhydrologischer Modellierung an den 45 Referenzstationen möglich (Kap. 4.2).

#### 4.2 Abflusssseitige Validierung

Für die abflusssseitige Validierung wurden wiederum die 45 Validierungsstandorte verwendet. Es wurden hydrodynamische und Schmutzfracht-Berechnungen für alle Szenarien anhand der Ersatznetze durchgeführt. Die Schmutzfracht-Berechnungen erfolgten einheitlich mit dem hydrologischen Modell KOSIM. Die hydrodynamischen Berechnungen erfolgten für 30 Standorte mit dem Modell HYSTEM-EXTRAN und für 15 Standorte mit dem Modell ++SYSTEMS separat durch zwei Expertenteams, um die Unabhängigkeit der Validierung vom verwendeten, abflusssseitigen Modell zu unterstreichen. Die zwei unterschiedlichen Modelle wurden entsprechend der jeweiligen Expertise verwendet. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde vorab an ausgewählten Standorten nachgewiesen, dass die Modelle sehr ähnliche Resultate liefern. Bei dem Überstaunachweis erfolgt eine Auswertung der Zielgrößen für jeden Schacht separat und wird anschließend mithilfe der Zielkriterien über alle Schächte ausgewertet. Bei der Schmutzfracht-Berechnung werden für jedes Entlastungsbauwerk die mittleren Jahresergebnisse betrachtet und mithilfe der Zielkriterien analysiert.

##### 4.2.1 Anwendungsbereich Überstaunachweis

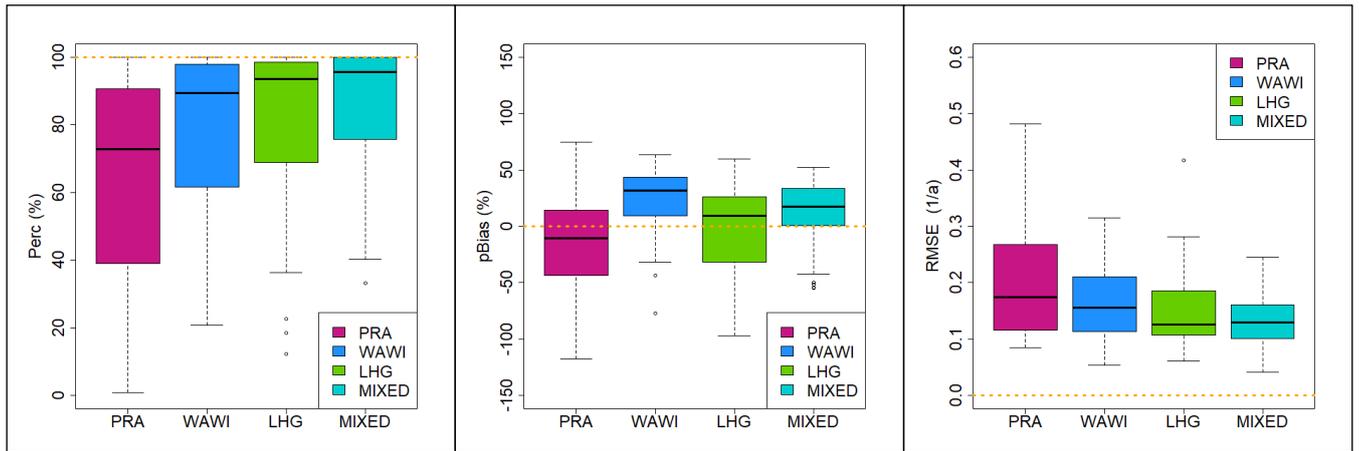
Die Ergebnisse für den Anwendungsbereich Überstaunachweis sind für die Zielgröße Überstauwiederkehrzeit in der Abbildung 8 dargestellt. Für die Überstauwiederkehrzeit liefert das Mischszenario (B-MIXED) insgesamt das beste Ergebnis. Für das Gütemaß PERC sind die größten Übereinstimmungen mit dem Vertrauensbereich der Referenzzeitreihe festzustellen; der RMSE zeigt parallel für alle Szenarien die geringsten Fehler. Allerdings ist für den pBIAS im Median eine leichte systematische Über-



**Abbildung 7**

Boxplots des prozentualen systematischen Fehlers der geschätzten Starkniederschläge für verschiedene Dauerstufen und Wiederkehrzeiten für das Praxisszenario (C) und das Mischszenario (B-MIXED) für die 45 Validierungsstationen.

Box plots for the percentage bias for extreme precipitation with different durations and return periods considering the practice scenario (C) and the mixed synthetic rainfall (B-MIXED) and for the 45 validation stations.



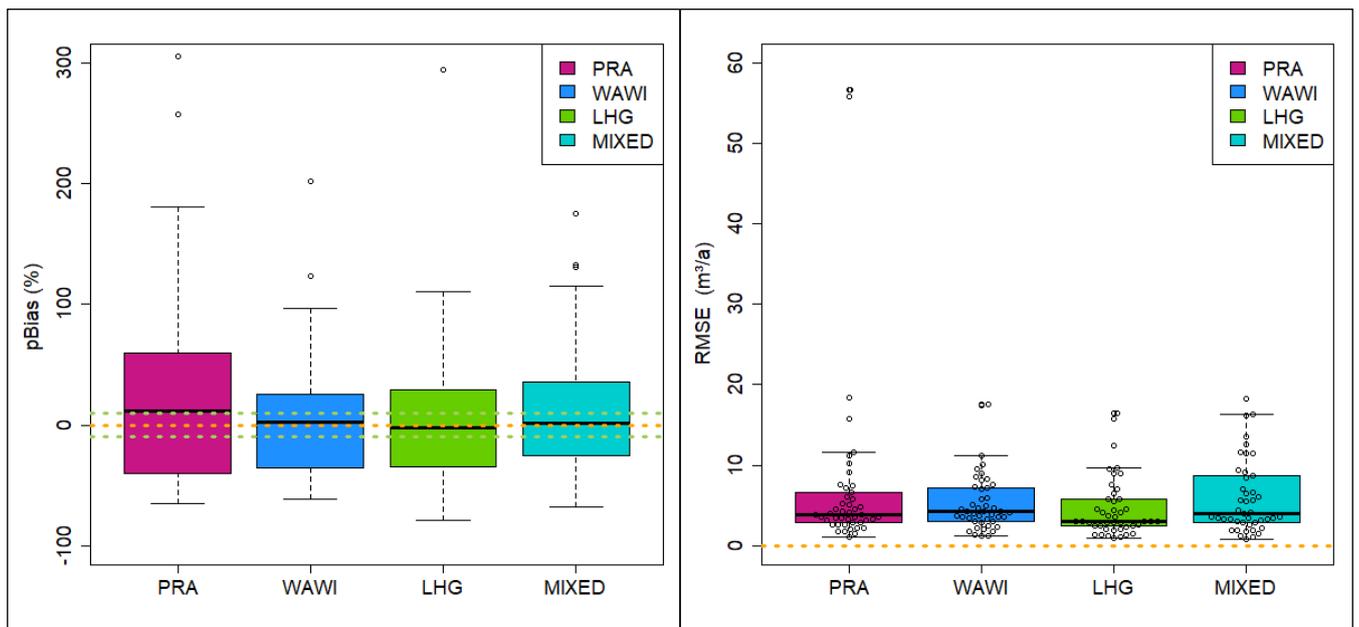
**Abbildung 8**

Boxplots für die Übereinstimmung mit dem Vertrauensbereich (PERC), des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Überstauwiederkehrzeit aus der hydrodynamischen Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the agreement with the confidence interval (PERC) as well as the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the return period of inundations from hydrodynamic simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

schätzung der Überstauwiederkehrzeit zu beobachten, was an der Unterschätzung der Niederschlagsintensität liegen könnte. Dies könnte in der Praxis zu einer leichten Unterbemessung führen, die eventuell durch einen geringen Sicherheitsaufschlag ausgeglichen werden kann. Die Bandbreite und damit extreme Fehler sind jedoch beim Mischszenario deutlich geringer als beim Praxisszenario.

Die Abbildung 9 zeigt für die hydraulische Berechnung die Simulationsgüte für die Zielgröße Überstauvolumen. Für den pBIAS ist für die synthetischen Zeitreihen eine zentrale Lage der Mediane ersichtlich, die nahezu bei dem 0-Wert liegt, während das Praxisszenario eine systematische Überschätzung in der Größenordnung von +10 % zeigt und die Bandbreite am größten ist. Für den RMSE zeigen die Ergebnisse der synthetischen Zeit-



**Abbildung 9**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für das Überstauvolumen aus der hydraulischen Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for inundation volume from hydraulic simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).

reihen für B-WAWI und B-LHG tendenziell geringfügig bessere Werte als das Praxisszenario. Auffällig sind für das Praxisszenario zwei extreme Ausreißer. Die MIXED-Zeitreihen zeigen allerdings eine größere Streuung im Vergleich zum Praxisszenario; die Lage des Medians ist jedoch gut vergleichbar.

**4.2.2 Anwendungsbereich Schmutzfracht-Berechnung**

Für die Schmutzfracht-Berechnung werden in den Abbildungen 10 bis 12 Vergleiche für die Zielgrößen "jährliche Anzahl der Überläufe", "Überlaufdauer" und "Überlaufvolumen" gezeigt. Für alle drei Zielgrößen zeigen die synthetischen Reihen im Vergleich zum Referenzszenario deutlich geringere Fehler als das Praxisszenario. Außerdem zeigt sich hier der Kompensationseffekt der gemischten synthetischen Reihen, welche hier nochmal besser abschneiden als bei Verwendung von Niederschlagsdaten von jedem Niederschlagsmodell allein.

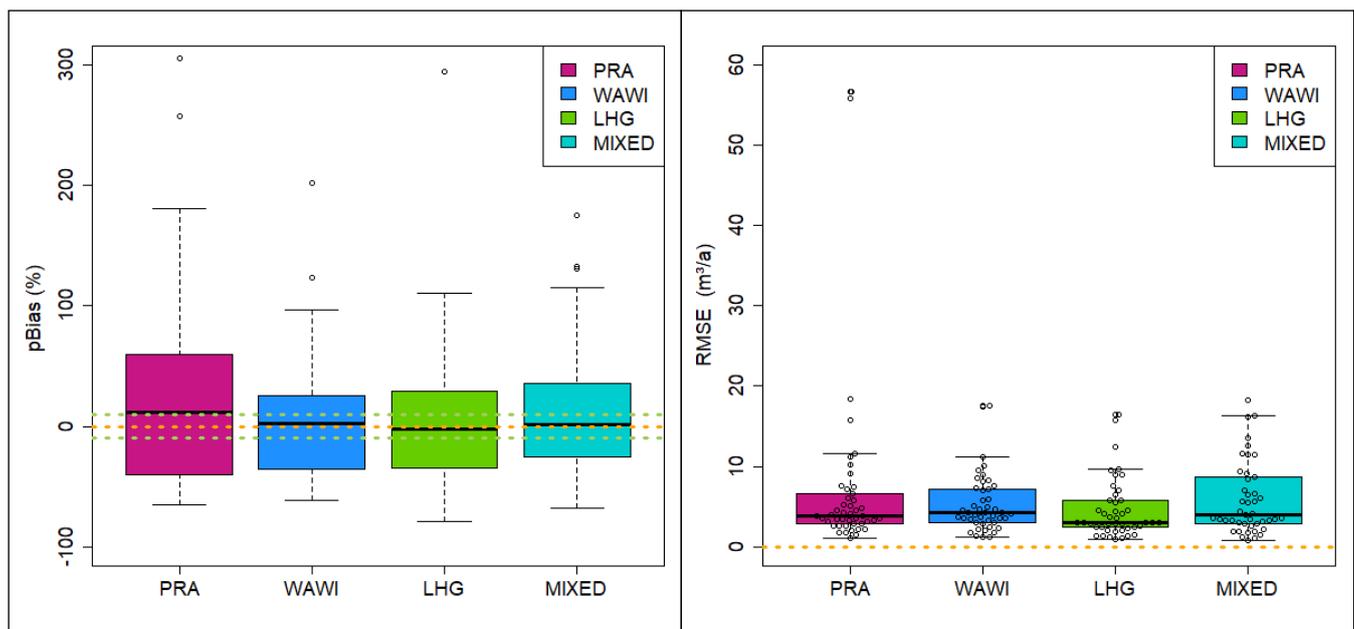
Zusammenfassend kann aus der abflussseitigen Validierung geschlossen werden, dass die gute Übereinstimmung mit den beobachteten Referenzzeitreihen (absolute Aussage) als auch die Überlegenheit gegenüber den Ergebnissen des Praxisszenarios (relative Aussage) die Eignung der synthetischen Zeitreihen für die Bemessungspraxis nachweisen. Durch die Mischung der Zeitreihen (MIXED) wird ein höheres Maß an Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Referenzzeitreihen erzielt, d. h. die Genauigkeit wird verbessert. Es ist weiterhin festzustellen, dass die Übereinstimmung der Ergebnisse der synthetischen Zeitreihen mit denen auf Basis der beobachteten Referenz für den Anwendungsbereich der Schmutzfracht-Berechnung generell größer ist als für den Anwendungsbereich der hydraulischen Überstaunachweisführung. Die Ursache ist im Wesentlichen auf die Ereignischarakteristik zurückzuführen; während bei

der Schmutzfracht-Berechnung die kontinuierlichen Zeitreihen maßgebend sind, die die gesamte Ereignisbandbreite enthalten, d. h. die durch häufige Ereignisse mit kleiner oder mittlerer Ereignishöhe dominiert werden, sind für den Bemessungsbereich der hydraulischen Leistungsfähigkeit seltenere intensive bzw. Starkregenereignisse mit Wiederkehrzeiten  $T > 1$  Jahr maßgebend, die eine höhere Ereignisdynamik besitzen. Abschließend ist den synthetischen Zeitreihen eine höhere Robustheit gegenüber möglichen Extrema in dem Praxisszenario zu unterstellen. Durch die Synthese der Niederschlagsinformation für ein Zielgebiet aus mehreren regionalisierten Beobachtungszeitreihen werden hydrometeorologische Extreme, die z. B. in einer einzelnen Station (Praxisszenario) enthalten sein können, abgemindert bzw. ausgeglichen.

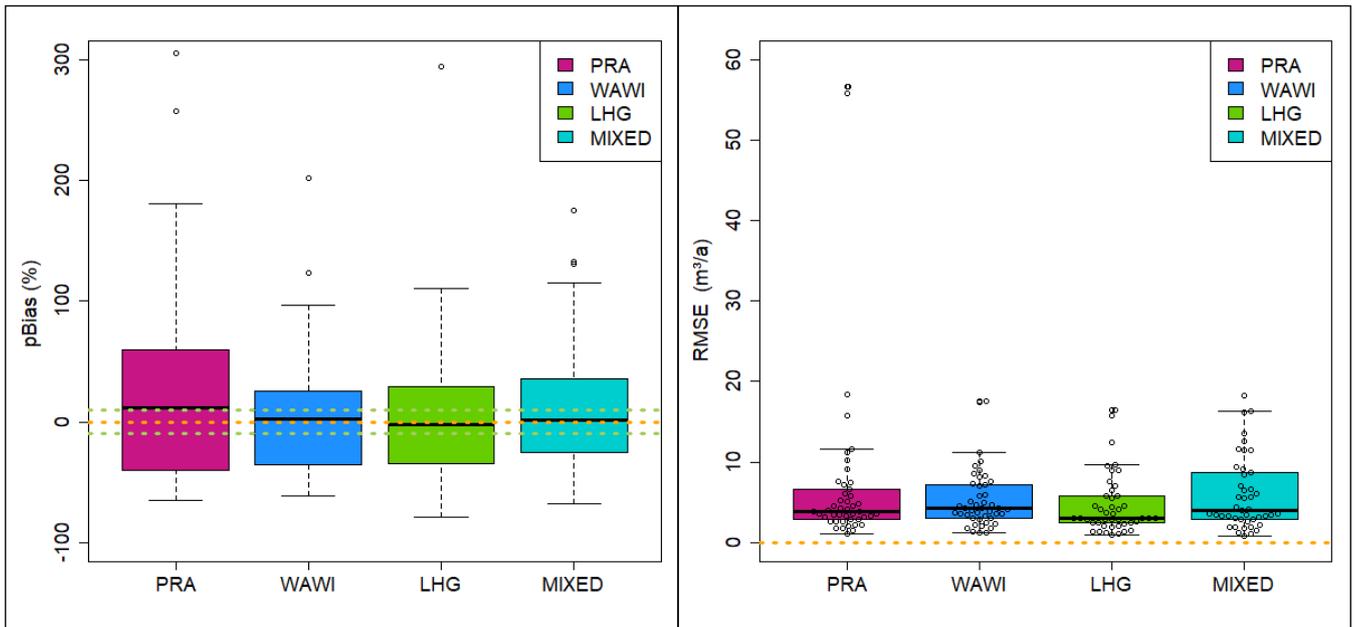
**5 Mapping, Datenbereitstellung und Unsicherheitsaspekte**

Zur deutschlandweiten Bereitstellung der synthetischen Daten wurden die Modellparameter vom WAWI-Modell und die Charakteristiken vom LHG-Modell auf einem Raster von 1 km x 1 km regionalisiert (Kap. 2). Die Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Regionalisierung für die Ereignisparameter des WAWI-Modells im Sommer. Ähnliche Darstellungen liegen für die weiteren Parameter und Charakteristiken vor. Diese bilden zusammen mit den beiden Niederschlagsmodellen die Basis für eine Webapplikation, mit der für jeden beliebigen Standort in Deutschland synthetische Regenreihen erzeugt und bereitgestellt werden können (<https://regen.itwh.de/>).

Neben der durchgeführten Validierung (Kap. 4.1 und 4.2) war es auch von Interesse, die Unsicherheiten räumlich zu unter-



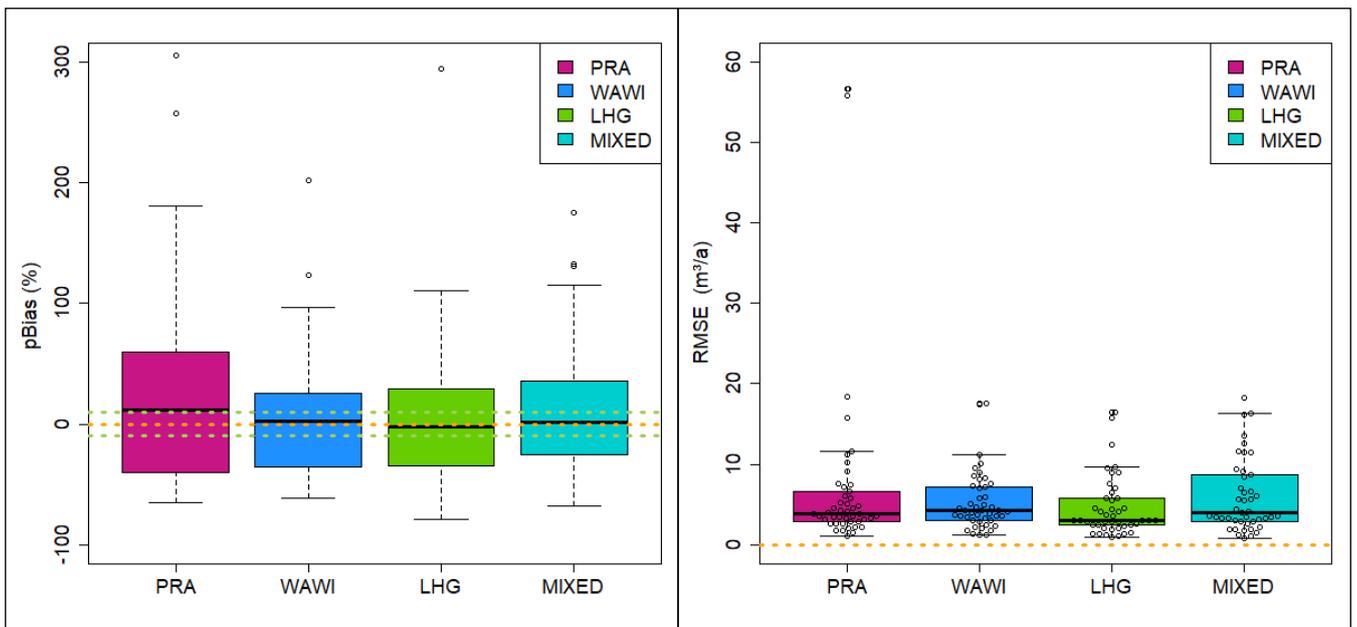
**Abbildung 10**  
 Boxplots des systematischen (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Anzahl der Überläufe (NUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).  
 Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the number of discharge events (NUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).



**Abbildung 11**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für die Überlaufdauer (TUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

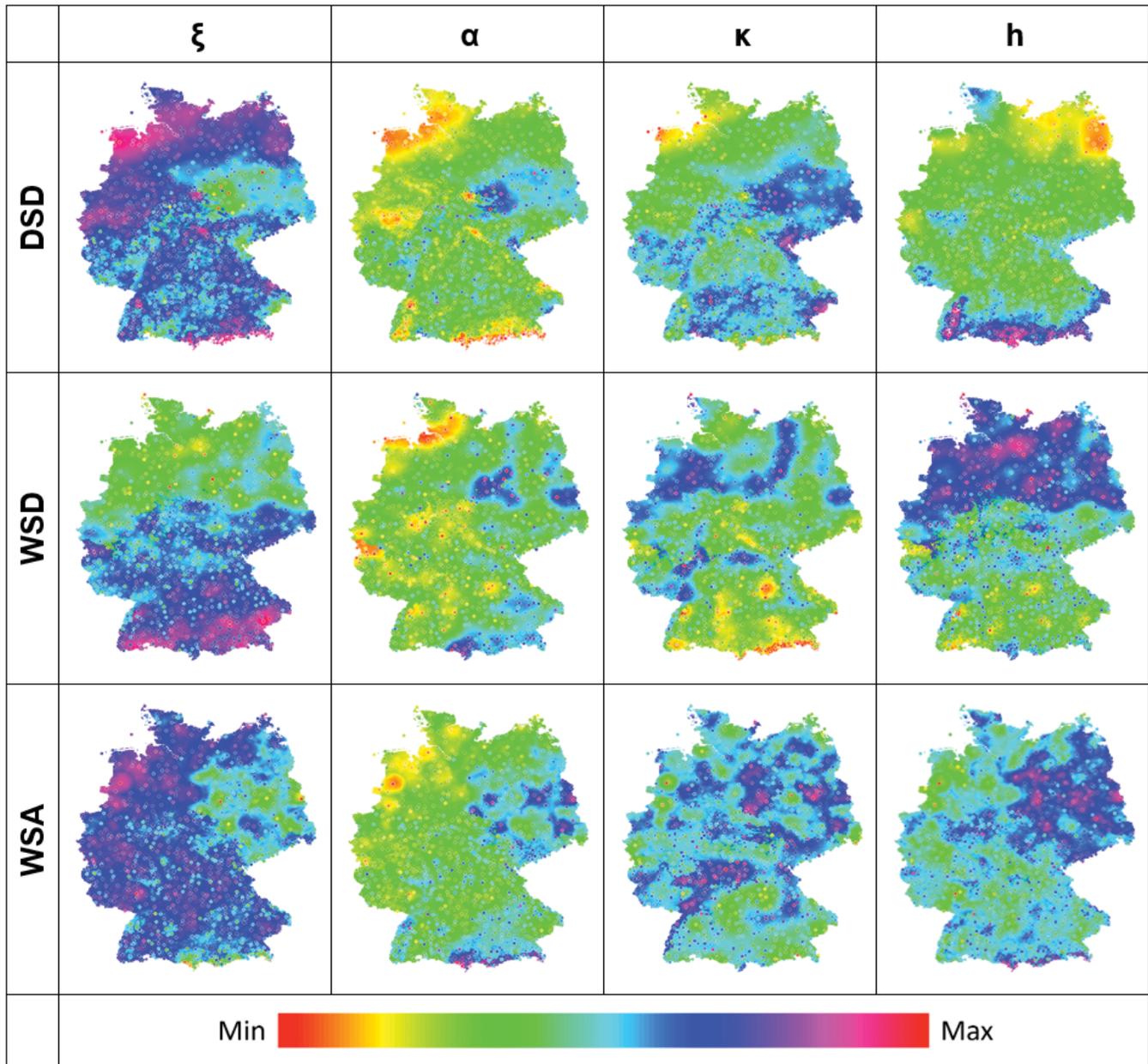
Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the discharge duration (TUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).



**Abbildung 12**

Boxplots des systematischen Fehlers (pBias) und des Standardfehlers (RMSE) für das Überlaufvolumen (VQUE) aus der Schmutzfracht-Berechnung für alle Validierungsstandorte und Szenarien (45 Standorte, 300 a synthetischer Niederschlag).

Box plots for the percentage bias (pBias) and the standard error (RMSE) for the discharge volume (VQUE) from pollution load simulations for all scenarios and validation locations (45 locations, 300 yr synthetic rainfall).



**Abbildung 13**

Schematische Visualisierung von regionalisierten Parametern des WAWI-Modells (Parameter der Kappaverteilung:  $\xi$  – Lage,  $\alpha$  – Maßstab,  $\kappa, h$  – Form; CALLAU PODUJE & HABERLANDT, 2017) für die verschiedenen Ereignisseigenschaften im Sommer auf deutschlandweitem Raster von 1 km x 1 km und beobachtete Parameter an 803 Stationen (Punkte).

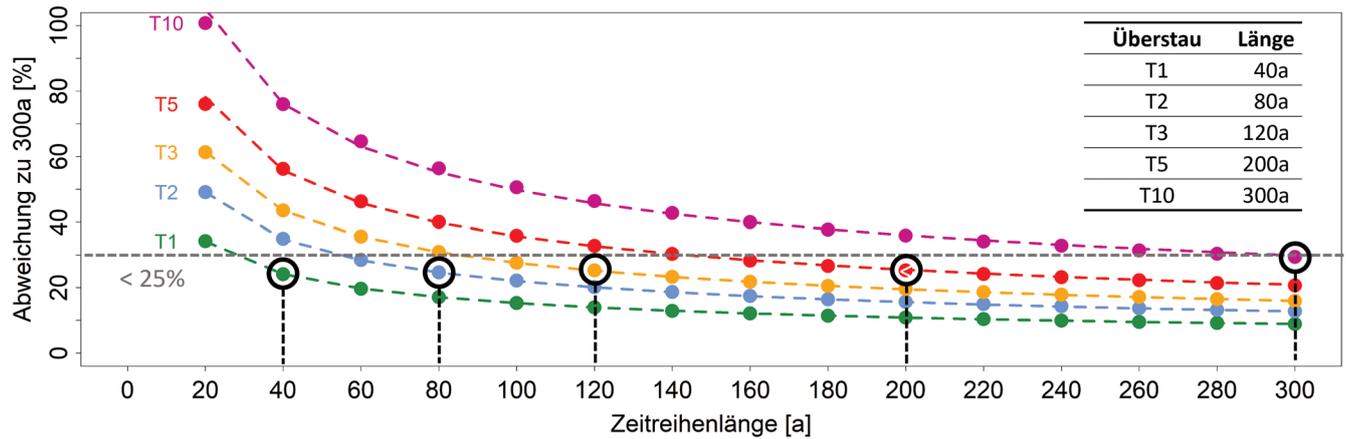
*Schematic of the regionalised parameters of the WAWI model (parameters of the Kappa distribution:  $\xi$  – location,  $\alpha$  – scale,  $\kappa, h$  – shape; CALLAU PODUJE & HABERLANDT, 2017) for different event characteristics in summer on a German wide 1 km x 1 km grid and observed parameters for the 803 locations (points).*

suchen. Dafür wurden die Fehlerkriterien der Überstau- und der Schmutzfracht-Berechnung für alle 45 Validierungsstandorte räumlich analysiert. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass die Fehler im Raum zufällig sind. Für praktische Zwecke kann der Schätzfehler somit nur als Mittelwert der Fehler über alle Standorte abgeschätzt werden, so wie dies bereits im Kapitel 4.2 dargestellt wurde.

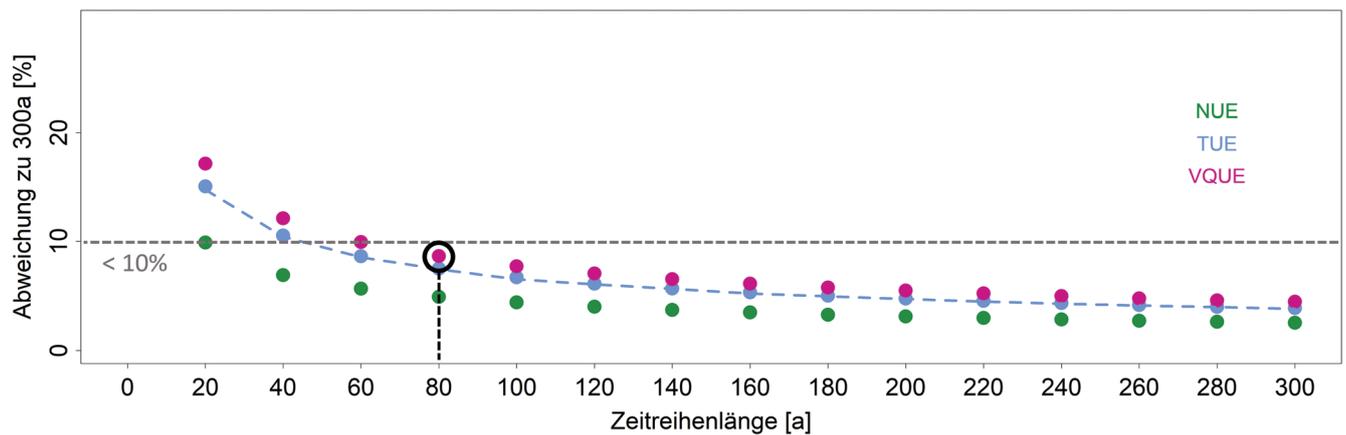
## 6 Empfehlungen zur Zeitreihenlänge

Die Ergebnisse in den Kapiteln 4.1 und 4.2 basieren auf synthetischen Regenreihen mit einer Länge von 300 Jahren, welches als

ausreichende Länge für die statistische Beurteilung der Ergebnisse angesehen wurde. Hydraulische Berechnungen für größere Kanalnetze mit diesen langen Zeitreihen sind rechenzeitintensiv. Deshalb wurde für die praktische Bemessung untersucht, welche Unsicherheit bei einer Verkürzung der Zeitreihenlänge zu erwarten ist. Dafür wurde ein Postprozessing der Simulationsergebnisse für die hydrodynamischen und Schmutzfracht-Berechnungen durchgeführt. Mit Bootstrapping wurden aus den 300-jährigen Ergebnisreihen stufenweise mit Wiederholung Stichproben, die weniger Jahre umfassen, gezogen und das Ergebnis jeweils mit dem für die 300-jährige Zeitreihe verglichen. Die Unsicherheiten, die sich daraus ergeben, sind für die Überstaunachweis-



**Abbildung 14** Unsicherheit der hydraulischen Bemessung bei der Ermittlung der Überstauwiederkehrzeit (90%-Quantil aus 1.000 Bootstrap-Stichproben) bei Verkürzung der Zeitreihenlänge im Vergleich zur Verwendung einer 300-jährigen Zeitreihe gemittelt über alle 45 Validierungsstandorte; die gestrichelte graue Linie markiert einen Wert von 25 % Unsicherheit.  
*Uncertainty of hydraulic simulations for the estimation of the inundation return period (90% quantile from 1.000 bootstrap samples) for shortening the time series compared to a 300 yr series averaged over all 45 validation locations; the dashed grey line indicates 25% uncertainty.*



**Abbildung 15** Unsicherheit der Schmutzfracht-Berechnung für die Zielkriterien Anzahl der Überläufe (NUE), Überlaufdauer (TUE) und Überlaufvolumen (VQUE) (90%-Quantil aus 1.000 Bootstrap-Stichproben) bei Verkürzung der Zeitreihenlänge im Vergleich zur Verwendung einer 300-jährigen Zeitreihe gemittelt über alle 45 Validierungsstandorte; die gestrichelte graue Linie markiert einen Wert von 10 % Unsicherheit.  
*Uncertainty of pollution load simulations for the estimation of no of discharge events (NUE), duration of discharge (TUE) and discharge volume (VQUE) (90% quantile from 1.000 bootstrap samples) for shortening the time series compared to a 300 yr series averaged over all 45 validation locations; the grey line indicates 10 % uncertainty.*

führung in Abbildung 14 und für die Schmutzfracht-Berechnung in Abbildung 15 dargestellt.

Die Unsicherheit der Überstauachweisführung ist für kurze Zeitreihen von 20 bis 30 Jahren, wie sie typischerweise Verwendung finden (Praxiszenario), sehr hoch. Sie hängt stark vom Wiederkehrintervall ab. Wenn für die rechentechnisch aufwändige Überstauachweisführung eine Unsicherheit von 25 % toleriert wird, werden z. B. für die Bemessung mit einem Wiederkehrintervall von  $T = 5$  a mindestens Zeitreihen mit 200 Jahren benötigt. Bei der weniger durch einzelne Extreme beeinflussten Schmutzfracht-Berechnung hingegen ist der Fehler, der mit kürzeren Zeitreihen gemacht wird, deutlich kleiner. Toleriert man hier eine Unsicherheit von 10 %, wird empfohlen, mit einem Kontinuum von wenigstens 80 Jahren zu rechnen.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Generierung der synthetischen Regenzeitreihen in Deutschland wurden zwei Niederschlagsmodelle verwendet, die mit verschiedenen statistisch-stochastischen Ansätzen arbeiten. Sie liefern kontinuierliche Regenzeitreihen in 5-minütiger Auflösung, die die Niederschlagscharakteristiken des Zielortes wiedergeben. Die Niederschlagsmodelle wurden anhand von ca. 800 Niederschlagsstationen in Deutschland parametrisiert und flächendeckend für ein Raster von 1 km x 1 km regionalisiert. Die Validierung der Modelle erfolgte anhand von 45 Teststandorten, wofür 20-jährige Referenzzeitreihen zur Verfügung standen. Dies geschah einerseits über Niederschlagscharakteristika wie z. B. Ereignisseigenschaften, Extremwertstatistik und andererseits über Abflusscharakteristika, d. h. Überlauf- und Über-

staustatistiken, die aus der Simulation mit Kanalnetzmodellen gewonnen wurden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Niederschlagsmodelle Praxisreife erreicht haben und im Vergleich zum Referenzszenario meistens gleichwertige oder bessere Ergebnisse als ein Praxisszenario liefern. Eine Mischung der synthetischen Daten beider Niederschlagsmodelle führt durch Fehlerkompensation zu besseren Simulationsergebnissen als die Verwendung der Daten eines einzelnen Modells.

Für die wasserwirtschaftliche Praxis wurde eine Softwareplattform entwickelt, mit der nun für beliebige Standorte in Deutschland synthetische Regenreihen zur Verfügung gestellt werden können. Eine sinnvolle Weiterentwicklung der Niederschlagsmodelle für die Zukunft wäre die multivariate Niederschlagsimulation, welche eine räumliche variable Niederschlagsbelastung über einem Untersuchungsgebiet erlaubt. Als eine weitere zukünftige Untersuchung sollte die instationäre Niederschlagsimulation betrachtet werden, mit der klimabedingte Änderungen im Niederschlagsgeschehen berücksichtigt werden können.

## 8 Summary and Conclusions

For the generation of the synthetic rainfall time series in Germany, two stochastic precipitation models were used that work with different statistical stochastic approaches. They provide continuous rainfall time series in 5-minute resolution that reflect the precipitation characteristics of the target location. The precipitation models were parameterised using approx. 800 precipitation stations in Germany and regionalised for a grid of 1 km x 1 km. The validation of the models was carried out on the basis of 45 test sites, for which 20-year long reference time series were available. This was done on the one hand via precipitation characteristics such as event characteristics and extreme value statistics and on the other hand via runoff characteristics, i.e. overflow and surcharge statistics, which were obtained from the simulation with sewer network models. The results have shown that the precipitation models have reached practical maturity and mostly provide equivalent or better results than a practical scenario compared to the reference scenario. A mixture of the synthetic data of both precipitation models leads to better simulation results than the use of the data of a single model due to error compensation. A software platform has been developed for water management practice with which synthetic rainfall series can now be made available for any locations in Germany. A sensible further development of the precipitation models for the future would be the multivariate precipitation simulation, which allows a spatially variable precipitation load over a study area. Transient precipitation simulation should be considered as a further future investigation, with which climate-related changes in the precipitation pattern can be taken into account.

### Datenverfügbarkeit

Alle Analysen basieren auf gemessenen Niederschlagsdaten, die vom DWD frei zur Verfügung gestellt werden: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html). Die entwickelten Niederschlagsmodelle selbst eignen sich aufgrund ihrer Komplexität und mangelnden Dokumentation nicht für eine Veröffentlichung. Die fünf Niederschlagsdatensätze, welche zur Validierung genutzt wurden: A) das Referenzszenario, B) die stochastischen Niederschläge von WAWI, LHG und MIXED sowie C) das Praxisszenario wurden für alle 45 Referenzstandorte auf dem Datenrepositorium des GFZ-Potsdam veröffentlicht und

sind frei verfügbar (<https://doi.org/10.5880/fidgeo.2022.018>). Für praktische Bemessungsaufgaben kann man sich synthetische Niederschlagsdaten für beliebige Standorte über die Webapplikation <https://regen.itwh.de/> gegen ein Aufwandsentgelt generieren lassen. Die verwendeten urbanhydrologischen Modelle sind kommerzielle Produkte und nicht frei verfügbar.

### Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung zur Fortführung des Verbundvorhabens SYNOPSE II innerhalb der Fördermaßnahme "Intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (INIS)" im Rahmenprogramm "Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONIA". Außerdem gilt unser Dank den zwei anonymen Gutachtern, die mit ihren nützlichen Hinweisen zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

### Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt  
Dr.-Ing. Anne Bartens (geb. Fangmann)  
Ross Pidoto, M.Sc.  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft  
Appelstr. 9a  
30167 Hannover  
[haberlandt@iww.uni-hannover.de](mailto:haberlandt@iww.uni-hannover.de)  
[fangmann@iww.uni-hannover.de](mailto:fangmann@iww.uni-hannover.de)  
[pidoto@iww.uni-hannover.de](mailto:pidoto@iww.uni-hannover.de)

Dr.-Ing. Stefan Krämer  
Dr.-Ing. Lothar Fuchs  
Stefanie Maßmann, Dipl.-Ing.  
Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH  
Engelbosteler Damm 22  
30167 Hannover  
[s.kraemer@itwh.de](mailto:s.kraemer@itwh.de)  
[l.fuchs@itwh.de](mailto:l.fuchs@itwh.de)  
[s.massmann@itwh.de](mailto:s.massmann@itwh.de)

Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Micha Eisele, M.Sc.  
Dr.-Ing. Jochen Seidel  
Universität Stuttgart  
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung  
Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart  
[bardossy@iws.uni-stuttgart.de](mailto:bardossy@iws.uni-stuttgart.de)  
[eisele@iws.uni-stuttgart.de](mailto:eisele@iws.uni-stuttgart.de)  
[seidel@iws.uni-stuttgart.de](mailto:seidel@iws.uni-stuttgart.de)

Dr. Thomas Müller  
WALD + CORBE Consulting GmbH  
Fritz-Reuter-Straße 18  
70193 Stuttgart  
[t.mueller@wald-corbe.de](mailto:t.mueller@wald-corbe.de)

Klaus-Jochen Sympher, Dipl.-Ing.  
 Philipp Birkholz, M.Sc.  
 Dr.-Ing. Pecher und Partner Ingenieurgesellschaft mbH  
 Sachsendamm 93, Aufgang B  
 10829 Berlin  
 klaus.sympher@pecherundpartner.de  
 philipp.birkholz@pecherundpartner.de

Andreas Kuchenbecker, Dipl.-Ing.  
 Ole-Christian Herrmann, M.Sc.  
 HAMBURG WASSER  
 Billhorner Deich 2  
 20539 Hamburg  
 Ole-Christian.Herrmann@hamburgwasser.de  
 Andreas.Kuchenbecker@hamburgwasser.de

### Literaturverzeichnis

- ARNBJERG-NIELSEN, K. (2012): Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, 9(2): 57-65.
- BÁRDOSSY, A. (1998): Generating precipitation time series using simulated annealing. *Wat. Resour. Res.*, 34(7): 1737-1744.
- CALLAU PODUJE, A.C. & U. HABERLANDT (2017): Short time step continuous rainfall modeling and simulation of extreme events. *Journal of Hydrology*, 552: 182-197.
- COWPERTWAIT, P.S.P. (2010): A spatial-temporal point process model with a continuous distribution of storm types. *Water Resour. Res.*, 46(12): W12507.
- DWA-A118 (2006): Arbeitsblatt DWA-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A531 (2012): Arbeitsblatt: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A102 (2020) Arbeitsblatt: Regenwetterabflüsse. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- HABERLANDT, U., A. BÁRDOSSY, P. BIRKHOLOZ, M. EISELE, A. FANGMANN, L. FUCHS, O.-C. HERRMANN, S. KRÄMER, A. KUCHENBECKER, S. MABMANN, B. MORALES, R. PIDOTO, T. MÜLLER, J. SEIDEL & K. SYMPHER (2020): Synthetische Niederschlagszeitreihen für die optimale Planung von Stadtentwässerungssystemen – SYNOPSIS II. Abschlussbericht im BMBF Schwerpunkt INIS. Institut für Wasserwirtschaft, Hannover.
- HABERLANDT, U., Y. HUNDECHA, M. PAHLOW & A. SCHUMANN (2011): Rainfall generators for application in flood studies. In: A. Schumann (Editor), *Flood Risk Assessment and Management*. Springer, pp. 117-147.
- ITWH (2018a): HYSTEM-EXTRAN Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.
- ITWH (2018b): KOSIM, Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftlich Hydrologie GmbH, Hannover.
- LICZNAR, P., C. DE MICHELE & W. ADAMOWSKI (2015): Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(1): 485-506.
- MÜLLER, T., T. MOSTHAF & A. BÁRDOSSY (2018): Bewertung der Eignung synthetischer NiedSim3 Niederschlagszeitreihen für Kanalnetzsimulationen unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Niederschlags. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62(4): 233-247.
- ONOF, C., R.E. CHANDLER, A. KAKOU, P. NORTHROP, H.S. WHEATER & V. ISHAM (2000): Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: A review of developments. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 14: 384-411.
- PARK, J., D. CROSS, C. ONOF, Y. CHEN & D. KIM (2021): A simple scheme to adjust Poisson cluster rectangular pulse rainfall models for improved performance at sub-hourly timescales. *Journal of Hydrology*, 598: 126296.
- TANDLER.COM (2018): ++SYSTEM Modellbeschreibung, Ges. für Umweltinformatik mbH, Buch am Erlbach.

Janine Köhn, Marcus Beylich, Ralph Meißner, Holger Rupp & Frido Reinstorf

# Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regen-erosivitätsfaktors auf Basis von Monatswerten

Regression models for the evaluation of the rainfall factor with regard to climate change on the basis of monthly values

Der R-Faktor als Maß für die Erosivität von Niederschlagsereignissen findet Anwendung in der Quantifizierung von Bodenverlusten mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG). Die Berechnung des R-Faktors nach Normvorschrift bedarf zeitlich hoch aufgelöster Niederschlagsdaten, die meist nicht flächendeckend vorhanden sind. Aufgrund dessen werden Regressionsmodelle, wie z. B. die länderspezifischen Gleichungen der DIN 19708:2017-08 – "Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG" oder auch räumlich hoch aufgelöste Radarniederschlagsdaten eingesetzt. In dieser Studie werden zwei für die Praxis einfach gehaltene, regionale Regressionsmodelle für den Landkreis Mansfeld-Südharz zur Berechnung von R-Faktoren vorgestellt. Mit Regressionsgleichung 1 wird ähnlich der Ländergleichung, jedoch auf Grundlage von 6 monatlichen Niederschlagsfaktoren, der R-Faktor auf Landkreisebene berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gleichung eine höhere Genauigkeit aufweist als die DIN-Gleichung für Sachsen-Anhalt. Mit Regressionsgleichung 2 wird auf Grundlage von monatlichen Niederschlagsänderungsfaktoren die Zu- bzw. Abnahme des R-Faktors ermittelt. Die Gleichung wird speziell für die Betrachtung des Klimawandels eingesetzt. Die Validierung anhand von Änderungssignalen eines regionalen Klimamodellensembles des RCP8.5-Szenarios zeigt eine hohe Modellgüte mit einer mittleren Abweichung vom DIN-R-Faktor in der Nahen und Fernen Zukunft von etwa 1 % und einem Korrelationskoeffizienten von größer 0,9.

**Schlagwörter:** R-Faktor, Erosivität, Regressionsmodell, Klimawandel, Bodenerosion

The R-factor as a measure of the erosivity of precipitation events is used to quantify soil losses using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The calculation of the exact R-factor requires precipitation data with a high temporal resolution, which are usually not available widely. Due to this, regression models, such as the German Federal State related equation of DIN 19708:2017-08 – "Soil quality – Predicting soil erosion by water by means of ABAG" or spatially high-resolution radar rain data are used. In this study, two simple and practical, regional regression models for the Mansfeld-Südharz district for the calculation of R-factors are presented. Regression equation 1 calculates the R-factor at the county level similar to the state equation, but based on 6 monthly precipitation factors. The results show that the equation has a significantly higher accuracy than the DIN equation for Saxony-Anhalt. Regression equation 2 is used to determine the changes in the R-factor on the basis of monthly precipitation change factors. The equation is specifically developed for the consideration of climate change issues. Validation using change signals from a regional climate model ensemble of the RCP8.5 scenario shows high model quality with a mean deviation of the DIN-R factor in the Near and Far Future of about 1 % and a correlation coefficient of greater than 0.9.

**Keywords:** R-Factor, rainfall erosivity, regression model, climate change, soil erosion

## 1 Einleitung

Extreme Niederschlagsereignisse und der dadurch hervorgerufene Bodenabtrag sind ein global auftretendes Phänomen und ursächlich für den Verlust von fruchtbarem Boden. Die meist lokal auftretenden Ereignisse führen zu hohen Schäden, wie die Sturzflut von Braunsbach (BRONSTERT et al., 2017; VOGEL et al., 2017) im Mai 2016 und die Überschwemmungen im Juli 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (BÜRGER et al., 2021; JUNGHÄNEL et al., 2021) zeigen. Da sich eine projizierte Zunahme der Intensität und Häufigkeit von solchen Extremereignissen durch den Klimawandel negativ auf die Bodenabträge auswirkt (MÖLLER & WURBS, 2016), ist eine Abschätzung durch Modelle ein wesentliches Mittel, um Planungssicherheit für die Landnutzung in landwirtschaftlichen und kommunalen Bereichen zu erlangen.

Zur Quantifizierung von Bodenabträgen bzw. zur Erfassung der Erosionsgefährdung wurden seit dem 19. Jahrhundert eine

Reihe von konzeptionellen, empirischen und physikalisch basierten Modellen entwickelt (BORRELLI et al., 2021). Dazu gehörte auch die von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelte Bodenabtragsgleichung, die "Universal Soil Loss Equation" (USLE), welche global Anwendung findet (FISTIKOGLU & HARMANCIOGLU, 2002; BAGARELLO et al., 2008; CAO et al., 2015; BELASRI & LAKHOUILI, 2016). Die empirische Gleichung ermöglicht die Abschätzung eines langjährig mittleren Bodenabtrags auf Grundlage von Niederschlag sowie geologischen, topografischen und landwirtschaftlichen Kennwerten. In den 1980er Jahren passten SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) die Gleichung auf bayerische Verhältnisse an und schafften somit die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG). Die ABAG ist im deutschen Raum – in der DIN 19708 (2017) – etabliert und findet in zahlreichen praxisorientierten Anwendungsprogrammen, wie z. B. ABAGflux (WURBS et al., 2007), SEPAL (KIESEL et al., 2009), ABAG interaktiv (BRANDHUBER et al., 2018), ABAGis (HEILMANN et al., 2021) sowie auch in regionalen Projekten Anwendung, wie z. B. im

DynaC (MÖLLER & WURBS, 2016) oder BebeR (HEILMANN et al., 2021).

Der Regenerositätsfaktor (R-Faktor) der ABAG ist eine meteorologische Größe, die aus der kinetischen Energie von erosionswirksamen Regenereignissen berechnet wird. Da hierfür Niederschlagsintensität und -menge ausschlaggebend sind, werden zur Berechnung Niederschlagsdaten mit einer sehr hohen Auflösung (< 15 Min.) benötigt (YUE et al., 2020). Die Messungen derartiger Regenreihen stellen jedoch hohe Anforderungen an die Technik bzw. Ausstattung von meteorologischen Dienstleistern und sind daher gegenwärtig nicht flächendeckend bzw. in einer ausreichend langen Zeitspanne verfügbar. Aus diesem Grund wurden alternative Ansätze zur Schätzung des R-Faktors entwickelt, die z. B. auf der Verwendung von täglichen, monatlichen, halbjährlichen oder jährlichen Niederschlagssummen bzw. exponentiellen Gleichungen, den Fournier-Index oder den modifizierten Fournier-Index basieren (LOUREIRO & COUTINHO, 2001; DIODATO, 2004; ANGULO-MARTÍNEZ & BEGUERÍA, 2009; LEE & LIN, 2014; HERNANDO & ROMANA, 2016; TALCHABHADEL, 2020). Zudem kamen auch verschiedene Methoden zur Regionalisierung zur Anwendung (MEUSBURGER et al., 2012; BALLABIO et al., 2017; SADEGHI et al., 2017). In Deutschland wurden zur Regionalisierung des R-Faktors länderspezifische Regressionsgleichungen aufgestellt (SAUERBORN, 1994) und in die einschlägige Normvorschrift DIN 19708 (2017) integriert. Die sonst sehr zeit- und datenaufwändige R-Faktor-Berechnung wurde dadurch deutlich vereinfacht. Die ursprüngliche Datenbasis dieser Gleichungen ging auf Niederschlagszeitreihen von 1961 bis 1980 zurück (SAUPE, 1985). Diese wurde in jüngerer Zeit für Sachsen-Anhalt auf Grundlage von Zeitreihen von 2000 bis 2014 (17 Stationen) aktualisiert (WURBS & STEININGER, 2015). Dabei wurde deutlich, dass die Regressionsgleichungen den räumlichen R-Faktor für bestimmte Regionen, u. a. aufgrund der geringen Dichte von Stationen mit langjährig hochaufgelösten Niederschlagsdaten, nur eingeschränkt abbilden können. Hinzu kamen Schwierigkeiten beim Übergang zwischen den Bundesländern und die nicht ausreichende Erfassung von extremwertstatistischen Niederschlagskennwerten.

Die ungenügende räumliche Interpolation wurde auch von FISCHER et al. (2018) erkannt und verbessert. Die Autoren nutzten Radar-Niederschlagsdaten zur Ermittlung von räumlichen R-Faktoren, da für diese flächendeckend räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten zur Verfügung stehen. Die Nutzung von Radardaten gegenüber Regenschreibermessungen zur Erosionsabschätzung war jedoch nicht ohne Weiteres möglich, da die stark unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Messskalen zu Problematiken führten. Um diese zu minimieren, entwickelten die Autoren zeitliche und räumliche Skalierungsfaktoren und passten die Intensitätsschwelle im Berechnungsverfahren des R-Faktors an. Auf Grundlage dieser Korrekturfunktionen wurden von AUERSWALD et al. (2019a) auf Basis von radargestützten Niederschlagsdaten, eine deutschlandweit einheitliche, hochaufgelöste (1 x 1 km) Karte der Regenerosität erzeugt, welche zur Abschätzung eines zeitlich stabilen und räumlich differenzierten R-Faktors dient. Im Vergleich mit der bisher verwendeten Karte von SAUERBORN (1994) zeigte sich in der Auswertung von AUERSWALD et al. (2019a) eine starke Zunahme der Erosivität. Diese war jedoch nicht methodisch bedingt, sondern wurde von den Autoren auf eine grundlegende Änderung der Niederschlagscharakteristik zurückgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnis-

se wurden von AUERSWALD et al. (2019b), ELHAUS et al. (2019) bzw. FISCHER et al. (2020) der Einfluss des Klimawandels auf Starkniederschläge und den R-Faktor mithilfe von Trendberechnungen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich der R-Faktor zwischen 1962 und 2009 verdoppelt hat, d. h. jährlich um etwa 2 % angestiegen ist. Dies hätte eine regelmäßige Aktualisierung der Regenerositätskarte zur Folge, um eine Unterschätzung der sich aus dem R-Faktor ergebenden Bodenabträge zu vermeiden. Die Autoren empfahlen daher die Verwendung eines projizierten R-Faktors des Zentraljahres 2025 mit einer Erhöhung um 27 %. Die angepasste Karte ist im Onlinetool "ABAG interaktiv" für Planungszwecke integriert (BRANDHUBER et al., 2018).

Der Vorteil der Regenerositätskarte liegt in der hohen räumlichen Differenzierung sowie in der Erfassung der Heterogenität von extremen Niederschlagsereignissen. Das Verfahren zur Erstellung einer Karte aus gemessenen Radardaten ist jedoch vergleichsweise aufwendig, da die Messmethode nur indirekt ist. Die Radarmessung wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, wie z. B. Abschattung oder die Erfassung unerwünschter Objekte (Clutter). Deshalb sind eine umfangreiche Nachbearbeitung und Anpassung der Daten an meteorologische Stationen erforderlich. Hinzu kommen die Notwendigkeit von Skalierungs- und Berechnungskorrekturen bei der Ermittlung von R-Faktoren aus Radardaten. Erschwerend wirkt ferner, dass Radardaten erst seit Anfang des 21. Jahrhunderts vorliegen, wodurch auswertbare Datenreihen noch kurz und Auswertungen erst seit wenigen Jahren möglich sind. Häufig wird daher noch in vielen Bereichen der Praxis auf die etablierten Methoden der DIN 19708 (2017) zurückgegriffen. Insbesondere die Ländergleichungen werden aufgrund ihrer Einfachheit von Praktikern bevorzugt.

Für beide Verfahren, die Ländergleichungen und die radargestützte Regenerositätskarte, ist festzustellen, dass diese auf dem Messzeitraum ihrer Erstellung beruhen und nur begrenzt darüber hinaus gültig sind. Zudem sind die Ländergleichungen sowohl räumlich (Bundeslandebene) als auch zeitlich (jährliche bzw. halbjährliche Eingangsgrößen) als vergleichsweise grob aufgelöst einzuschätzen. Insbesondere im Hinblick auf eine sich ändernde Niederschlagscharakteristik im Zuge des Klimawandels wäre eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich, die jedoch keine aktuellen Klimaprojektionen berücksichtigen kann.

Um die damit verbundenen Unsicherheiten zu reduzieren, wurden in dieser Studie die saisonalen Einflussfaktoren auf den R-Faktor anhand von 10-Minuten-Messreihen untersucht und darauf aufbauend eine auf mittleren Monatsniederschlagssummen (Regressionsgleichung 1) basierende regionale Regressionsgleichung entwickelt. Damit soll eine verbesserte Methodik für regionale Anwendungen geschaffen werden. Die berechneten R-Faktoren wurden am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz mit den Ergebnissen der länderspezifischen Gleichung für Sachsen-Anhalt verglichen. Weiterhin wurde die Änderung zukünftiger R-Faktoren anhand eines Klimamodellensembles untersucht und geprüft, ob die zugehörigen Änderungen der R-Faktoren mithilfe von Regressionsgleichung 1 berechnet werden können. Darauf aufbauend wurde ein zweites Regressionsmodell (Regressionsgleichung 2) erstellt, das auf Grundlage von relativen Niederschlagsänderungen die relative Änderung des R-Faktors berechnet. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, auf Grundlage von bereits bestehenden R-Faktoren, wie z. B. aus

der Regressionsgleichung 1 oder aus hochaufgelösten Regen-erosivitätskarten, die Änderung des lokalen R-Faktors durch den projizierten Klimawandel abzuschätzen.

Ziel dieser Studie war die Validierung neuer Regressionsmodelle zur robusten Abschätzung von R-Faktoren, die einfach in der Anwendung sind, sodass sie auch im kommunalen und landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt werden können. Dabei sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden: i) Kann die auf mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierende Regressionsgleichung 1, angepasst auf den Landkreis Mansfeld-Südharz, die gegenwärtigen R-Faktoren im Vergleich zur Ländergleichung nach DIN präziser wiedergeben? ii) Ermöglicht die Regressionsgleichung 1 auch, den zukünftigen R-Faktor zuverlässig abzuschätzen? iii) Kann durch Anwendung der auf relativen Niederschlagsänderungen basierenden Regressionsgleichung 2 die Güte zur Bestimmung der klimawandelbedingten Änderungen des R-Faktors verbessert werden?

## 2 Material und Methoden

### Informationen zum Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie war der Landkreis Mansfeld-Südharz im östlichen Harzvorland, im Südwesten des Landes Sachsen-Anhalt (Abb. 1). Die Gesamtfläche von 1.448,8 km<sup>2</sup> entspricht etwa 7 % der Gesamtfläche von Sachsen-Anhalt. Das Gebiet liegt in der Nähe des Brockens, des höchsten Berges im Mittelgebirge Harz, und weist sehr heterogene Höhenverhältnisse zwischen 30 und 600 m ü. NHN auf (im Mittel 240 m ü. NHN). Trotz einer geringen mittleren Neigung von 5,4° treten vor allem an den Hängen der Flusstäler der Wipper, Eine, Helme und Böse

Sieben sowie deren Nebenflüssen und an den Grenzen von geologischen Plateaus starke Hangneigungen von 30°, selten bis zu 65° auf.

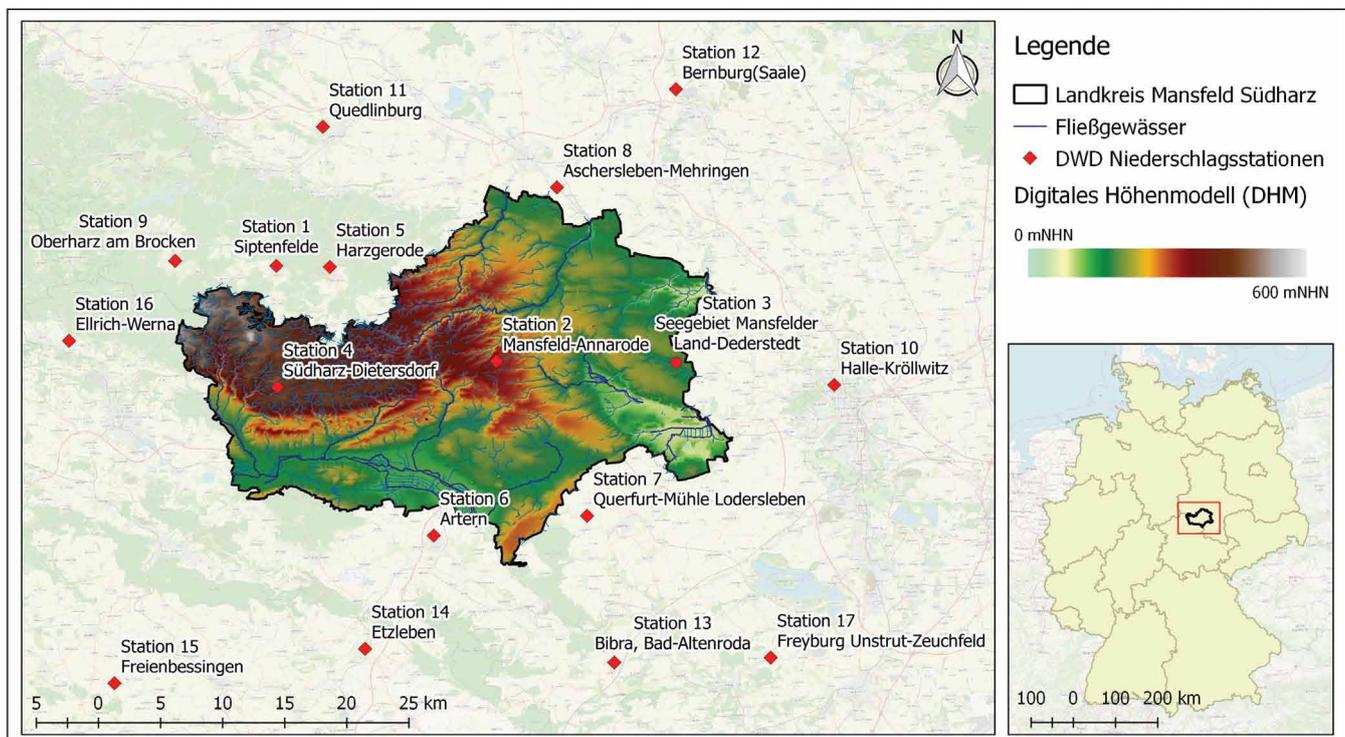
Weiterhin ist das Untersuchungsgebiet von tonig-schluffigen Böden geprägt, welche zu den fruchtbarsten, aber auch erosionsanfälligsten Böden gehören. Die Hauptlandnutzungsformen sind mit 50 % der Gesamtfläche der landwirtschaftlichen Nutzung und zu 25 % der forstwirtschaftlichen Nutzung zuzuordnen.

Aufgrund der Lage im Regenschatten des Harzes liegt der langjährig mittlere Jahresniederschlag mit etwa 605 mm unter dem deutschen Durchschnitt von 792 mm (Referenzzeitraum 1991 bis 2020) (MÜHR, 2021).

### Stationsniederschlagsdaten und projizierte Niederschlagsdaten der Klimamodelle

Grundlage der Untersuchungen zum R-Faktor waren 17 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in direkter Nähe des Landkreises Mansfeld-Südharz (Abb. 1 & Tab. 1) sowie 3 weiter entfernte Stationen, die für eine Validierungsvariante hinzugezogen wurden (Tab. 5) (DWD, o. J.). Die Niederschlagsdaten lagen in einer Auflösung von 10-Minuten vor und wurden für einen Zeitraum von min. 10 und max. 27 Jahren untersucht (insg. 266 gemessenen Stationsjahre, entspricht der Gesamtsumme der untersuchten Jahre aller 17 Stationen) (Tab. 1).

Die in dieser Studie verwendeten Klimamodelldaten basieren auf einem täglichen Klimaensemble aus Globalen Klimamodellen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) aus der



**Abbildung 1**  
Untersuchungsgebiet Landkreis Mansfeld-Südharz mit Höhenmodell und 17 repräsentativen DWD-Niederschlagsstationen.  
*Study area district Mansfeld-Südharz with elevation model and 17 DWD representative precipitation stations.*

**Tabelle 1**  
Übersicht der 17 Niederschlagsstationen repräsentativ für den Landkreis Mansfeld-Südharz.  
*Overview of the 17 precipitation stations representative for the district Mansfeld-Südharz.*

Nr.	Name der Station	Aufgabe im Regressionsmodell	Höhe	Zeitreihe	Jahresniederschlag $P_{\text{Jahr}}$	R-Faktor
			müNN	von – bis	mm	$N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$
<b>Station 1</b>	Siptenfelde - Messfeld	Erstellung Regressionsmodell/ Kalibrierung	395,0	1997 – 2018	657	73,9
<b>Station 2</b>	Mansfeld-Annarode		321,0	2007 – 2018	624	88,3
<b>Station 3</b>	Seegebiet Mansfelder Land-Dederstedt		154,0	2007 – 2018	543	93,3
<b>Station 4</b>	Südharz-Dietersdorf		440,0	2007 – 2018	709	85,5
<b>Station 5</b>	Harzgerode		404,0	1992 – 2018	588	57,0
<b>Station 6</b>	Artern		164,0	1992 – 2018	505	76,3
<b>Station 7</b>	Querfurt-Mühle Lodersleben		204,0	2007 – 2018	524	64,6
<b>Station 8</b>	Aschersleben-Mehringen		107,0	2007 – 2018	538	73,2
<b>Station 9</b>	Oberharz am Brocken		495,0	2005 – 13; 2018	757	81,5
<b>Station 10</b>	Halle-Kröllwitz	Validierung des Regressionsmodells	93,0	1992 – 2014	535	80,0
<b>Station 11</b>	Quedlinburg		142,0	2007 – 2018	515	79,6
<b>Station 12</b>	Bernburg/Saale (Nord)		84,0	2004 – 2018	520	69,6
<b>Station 13</b>	Bibra, Bad-Altenroda		265,0	2007 – 2018	565	88,7
<b>Station 14</b>	Etzleben		137,0	2003 – 2018	479	52,2
<b>Station 15</b>	Freienbessingen		296,0	2007 – 2018	563	69,3
<b>Station 16</b>	Ellrich-Werna		240,0	2003 – 2018	731	68,8
<b>Station 17</b>	Freyburg/Unstrut-Zeuchfeld		140,0	2005 – 2018	512	69,2

EURO-CORDEX-Datenbank und wurden vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zur Verfügung gestellt (JACOB et al., 2014). Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse in Niedersachsen und im Harz zu untersuchen, wurden die Modelldaten im Projekt KliBiW bias-adjustiert und auf ein Gitter von 10 × 10 km interpoliert (HÖLSCHER et al., 2017). Die in dieser Studie verwendeten dynamischen global-regionalen Modellketten basieren auf dem sogenannten Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5, d. h. repräsentativer Konzentrationspfad mit einem

Strahlungsantriebswert von 8,5 W\*m<sup>-2</sup> im Jahr 2100, verglichen mit dem Jahr 1850), entsprechend des 5. IPCC-Sachstandsberichts (Tab. 2) (IPCC, 2014).

Es konnte nicht auf hochaufgelöste Niederschlagsdaten eines Klimaensembles zurückgegriffen werden, da diese i. d. R. nur in einer täglichen, seltener in einer stündlichen Auflösung vorliegen. Um den Berechnungsaufwand möglichst gering zu halten und die Praxistauglichkeit der Regressionsmodelle zu gewährleisten, wurde auf die Anwendung komplexer Downscaling-

**Tabelle 2**  
Übersicht über die verwendeten global-regionalen Klimamodellketten (RCP8.5).  
*Overview of the global-regional climate model chains used in this study (RCP8.5).*

Globales Klimamodell (GCM)	Regionales Klimamodell (RCM)	Name	Datenlänge
CNRM-CM5	CCLM-4-8-17	CNRM_CCLM	1970 – 2100
CNRM-CM5	RCA4	CNRM_RCA4	1970 – 2100
EC-EARTH	CCLM-4-8-17	ECE_CCLM	1970 – 2100
EC-EARTH	HIRHAM5	ECE_HIRHAM	1951 – 2100
EC-EARTH	RACMO22E	ECE_RACMO	1951 – 2100
EC-EARTH	RCA4	ECE_RCA4	1970 – 2100
HadGEM2-ES	RACMO22E	HadGEM2_RACMO22E	1970 – 2099
HadGEM2-ES	RCA4	HadGEM2_RCA4	1970 – 2099
IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL_RCA4	1970 – 2100
IPSL-CM5A-MR	CCLM-4-8-17	IPSL_CCLM	1971 – 2100
MPI-ESM-LR	CCLM-4-8-17	MPI_CCLM	1951 – 2100
MPI-ESM-LR	RCA4	MPI_RCA4	1970 – 2100
MPI-ESM-LR	REMO (1) <sup>a)</sup>	MPI_REMO1	1951 – 2100
MPI-ESM-LR	REMO (2) <sup>a)</sup>	MPI_REMO2	1951 – 2100

<sup>a)</sup> verschiedene REMO-Läufe

Verfahren verzichtet. Zur Bestimmung der Regenerosivität wurden die monatlichen Niederschlagssummen der Klimamodellprojektionen ausgewertet und die Änderungssignale zum Zeitraum der Nahen Zukunft (2021 bis 2050) bzw. Fernen Zukunft (2071 bis 2100) ausgehend von der Vergangenheit (1981 bis 2010) berechnet. Zur Erzeugung von hochaufgelösten Niederschlagsreihen der Zukunft wurden die mittleren Änderungssignale der Nahen und Fernen Zukunft mit den vorhandenen 10-Minuten-Niederschlagswerten der Stationen 1 bis 9 multipliziert. Auf diese Weise erfolgte keine Änderung der zeitlichen Struktur der Niederschlagsreihen, jedoch wurden Häufigkeit und Intensität erosiver Ereignisse entsprechend den Änderungssignalen variiert.

**R-Faktor nach DIN 19708:2017-08**

Zur Bestimmung des R-Faktors wird in der DIN 19708 (2017) die Berechnungsvorschrift nach SCHWERTMANN et al. (1990) (im Folgenden mit "Normvorschrift" bezeichnet) genannt. Zusätzlich wird auf die behelfsweise Verwendung von bundeslandsspezifischen Regressionsgleichungen (im Folgenden "Ländergleichung") zur Abschätzung von R-Faktoren mit mittleren (Halb-) Jahresniederschlagssummen nach SAUERBORN (1994) verwiesen. In der Methode nach Normvorschrift werden zunächst die erosionswirksamen Niederschläge jedes Niederschlagsereignisses bestimmt und deren Energiedichte berechnet. Aus dem Produkt der Energiedichte und der auf eine Stunde bezogenen maximalen 30-Minuten-Intensität ergibt sich der R-Faktor eines Einzelereignisses (RE). Um die Jahreserosivität (R-Faktor eines Jahres) zu bestimmen, werden alle RE innerhalb eines Jahres aufsummiert. Da die Jahreserosivität von Jahr zu Jahr stark variieren kann, wird ein Mittel über mindestens 10 aktuelle Jahre empfohlen, woraus sich der langjährige mittlere R-Faktor ergibt. Details zum Berechnungsverfahren können der DIN 19708 (2017) entnommen werden. Der nach Normvorschrift bestimmte R-Faktor diene aufgrund seiner Genauigkeit für die in dieser Untersuchung aufgestellten Regressionsmodelle als Zielgröße bzw. Regressand.

Da die Methode nach Normvorschrift vergleichsweise zeit- und datenaufwändig ist, werden in der DIN zusätzlich die Ländergleichungen zur Ableitung des R-Faktors angegeben. Diese beschreiben einfache lineare Regressionsgleichungen zwischen dem R-Faktor und dem Jahres- bzw. Sommerhalbjahresniederschlag. Im weiteren Verlauf wurde nur die Sommerhalbjahresgleichung für das Land Sachsen-Anhalt (im Folgenden ST-Gleichung genannt) betrachtet, da diese nach DIN einen höheren Korrelationskoeffizienten (r) aufweist und damit statistisch robuster ist:

$$R = 0,28 \cdot NSo - 30,89 \quad r = 0,91 \quad [1]$$

mit

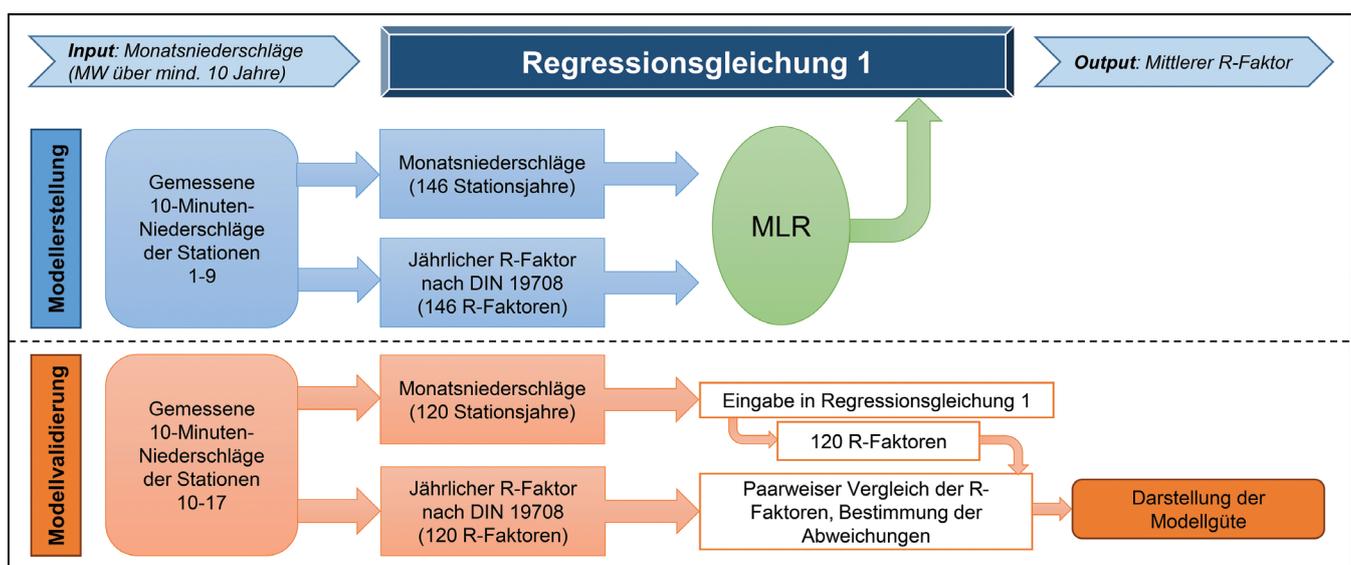
NSo            mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr (1. Mai bis 31. Oktober), in mm.

**Aufgestellte Regressionsmodelle**

Um die Vorteile einer regionalen, landkreisbezogenen Anpassung im Vergleich zur grobräumigeren, länderspezifischen Gleichung zu prüfen, wurde eine auf den Landkreis Mansfeld-Südharz optimierte Sommerhalbjahres-Regressionsgleichung erstellt (nachfolgend als MS-Gleichung bezeichnet). Die bestmögliche regionalspezifische Modellschätzung der R-Faktoren, basierend auf den mittleren Sommerniederschlagssummen der 146 Stationsjahre der Stationen 1 bis 9 (Tab. 1), ergibt sich wie folgt:

$$R = 0,249 \cdot NSo - 11,87 \quad r = 0,688 \quad [2]$$

Die Regressionsgleichung 1 (RG1) wurde unter Nutzung mehrerer monatlicher Niederschlagssummen der Stationen 1 bis 9 und dem nach Normvorschrift berechneten R-Faktor entsprechend dem Schema in Abbildung 2 aufgestellt. Da die Summen mehrerer Monate als Regressoren in das Modell eingingen, wurde eine multiple lineare Regression (MLR) durchgeführt. Im Prozess der



**Abbildung 2**  
 Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 1.  
 Scheme of model building and validation of the regression 1.

Regressionsmodellerstellung erfolgte die Prüfung verschiedener Varianten, wobei u. a. die Eignung verschiedener Monate als Regressoren überprüft wurde. Im Ergebnis wurden die Monate Mai bis September als signifikant festgestellt. Der Mittelwert der übrigen Monatssummen (Januar bis April und Oktober bis Dezember) wurde als separater Regressor verwendet. Die hieraus ermittelte RG1 ergab sich zu:

$$R = 0,19 \cdot N_{Mai} + 0,41 \cdot N_{Jun} + 0,26 \cdot N_{Jul} + 0,38 \cdot N_{Aug} + 0,21 \cdot N_{Sep} + 0,01 \cdot N_{Rest} - 8,56 \quad [3]$$

mit

$N_{Mai...Sep}$  mittlere monatliche Niederschlagssumme für die Monate Mai bis September, in mm;

$N_{Rest}$  Mittelwert der monatlichen Niederschlagssummen für die Monate Januar bis April und Oktober bis Dezember, in mm.

RG1 wurde entsprechend Abbildung 2 mithilfe der Niederschlagsdaten der Stationen 10 bis 17 validiert (split sampling). Als Maß für die Verfahrensgüte wurden die mittleren prozentualen Abweichungen, der Korrelationskoeffizient und die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen (RMSE) berechnet.

Das Schema zur Erstellung und Validierung der Regressionsgleichung 2 (RG2) ist in Abbildung 3 dargestellt. Ähnlich wie in RG1 wurde auch hier eine MLR durchgeführt, jedoch wurden die Änderungsfaktoren des R-Faktors aus den Änderungsfaktoren des monatlichen Niederschlags geschätzt. Der Bereich der untersuchten Niederschlagsänderungen sollte für eine robuste Modellerstellung möglichst großräumig (d. h. viele verschiedene Kombinationen der monatlichen Änderungsfaktoren) analysiert werden, während jedoch der Rechenaufwand durch eine begrenzte Anzahl an berechneten Kombinationen möglichst geringzuhalten war. Daher wurden die zu untersuchenden Sätze an Kombinationen mittels Latin Hypercube Sampling (LHS) erzeugt. Das LHS ist eine statistische Methode zur Erzeugung einer nahezu zufälligen und gleichförmigen Stichprobe von Parameterwerten aus einer mehrdimensionalen Verteilung (MCKAY et al., 1979).

Für die Aufstellung von RG2 wurden 500 Sätze von

Änderungsfaktoren der Monatsniederschläge erzeugt. Nebenbetrachtungen zeigten, dass eine größere Anzahl an Sätzen keine signifikante Verbesserung des Regressionsmodells zur Folge hatte. Die Änderungsfaktoren wurden zwischen 0,8 und 1,3 variiert, welches den 25%- und 75%-Perzentilen der Klimamodellketten entspricht. Die so entstandenen Sätze von Änderungsfaktoren wurden monatsweise mit den gemessenen 10-Minuten-Niederschlagsdaten der Stationen 1 bis 9 multipliziert und synthetische "zukünftige" Niederschlagsreihen erzeugt.

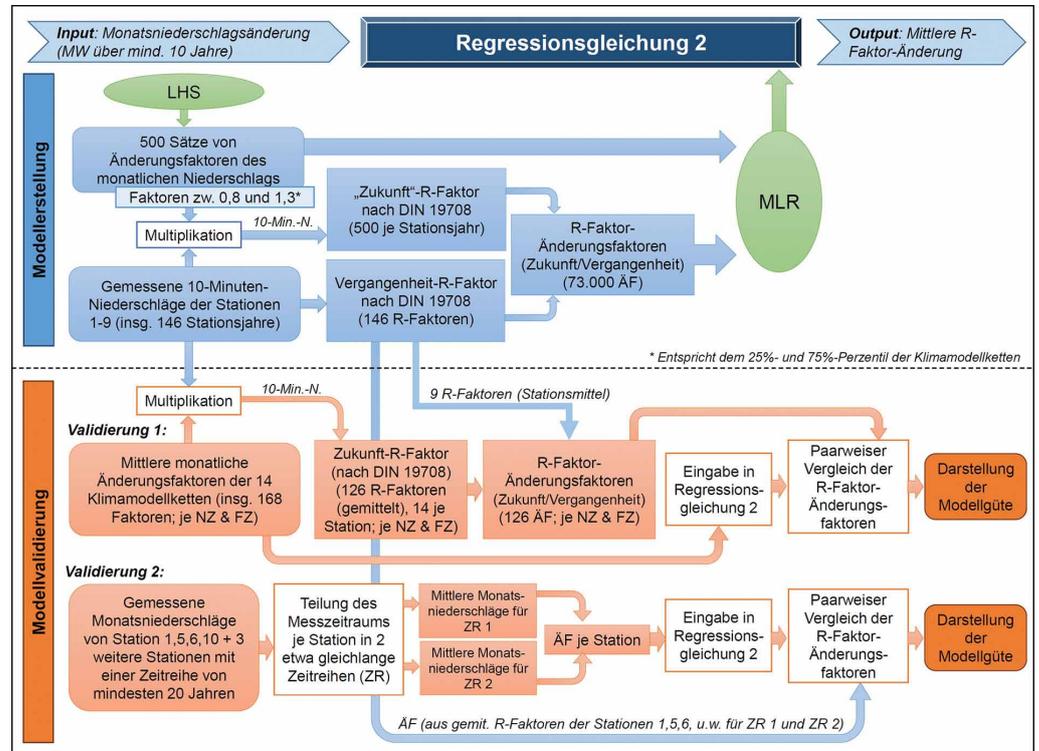
Aus diesen wurden nach genannter Normvorschrift "zukünftige" R-Faktoren für alle Stationsjahre bestimmt. RG2 wurde mit den Änderungsfaktoren der Monatsniederschläge und den Änderungsfaktoren der R-Faktoren bestimmt und ergab sich zu:

$$\begin{aligned} \text{ÄF}(R) = & 1 + 0,474 \cdot (\text{ÄF}(N_{Mai}) - 1) + 0,437 \cdot (\text{ÄF}(N_{Jun}) - 1) + \\ & 0,616 \cdot (\text{ÄF}(N_{Jul}) - 1) + 0,436 \cdot (\text{ÄF}(N_{Aug}) - 1) + \\ & 0,351 \cdot (\text{ÄF}(N_{Sep}) - 1) + 0,598 \cdot (\text{ÄF}(N_{Rest}) - 1) \end{aligned} \quad [4]$$

mit

$\text{ÄF}(R)$  Änderungsfaktor des R-Faktors  
( $R_{Zukunft} = R_{Vergangenheit} \cdot \text{ÄF}(R)$ )

$\text{ÄF}(N_{Mai...Sep})$  Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Mai bis September;



**Abbildung 3**

Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 2 (Abkürzungen in der Grafik: LHS – Latin Hypercube Sampling; MLR – Multiple Lineare Regression; N. – Niederschlag; ÄF – Änderungsfaktoren; NZ – Nahe Zukunft; FZ – Ferne Zukunft; ZR – Zeitreihe).

Scheme of model building and validation of the regression 2 (Abbreviations: LHS – Latin Hypercube Sampling; MLR – Multiple Linear Regression; N. – precipitation; ÄF – change factors; NZ – near future; FZ – far future; ZR – time series).

ÄF(N<sub>Rest</sub>) Rest-Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Januar bis April und Oktober bis Dezember.

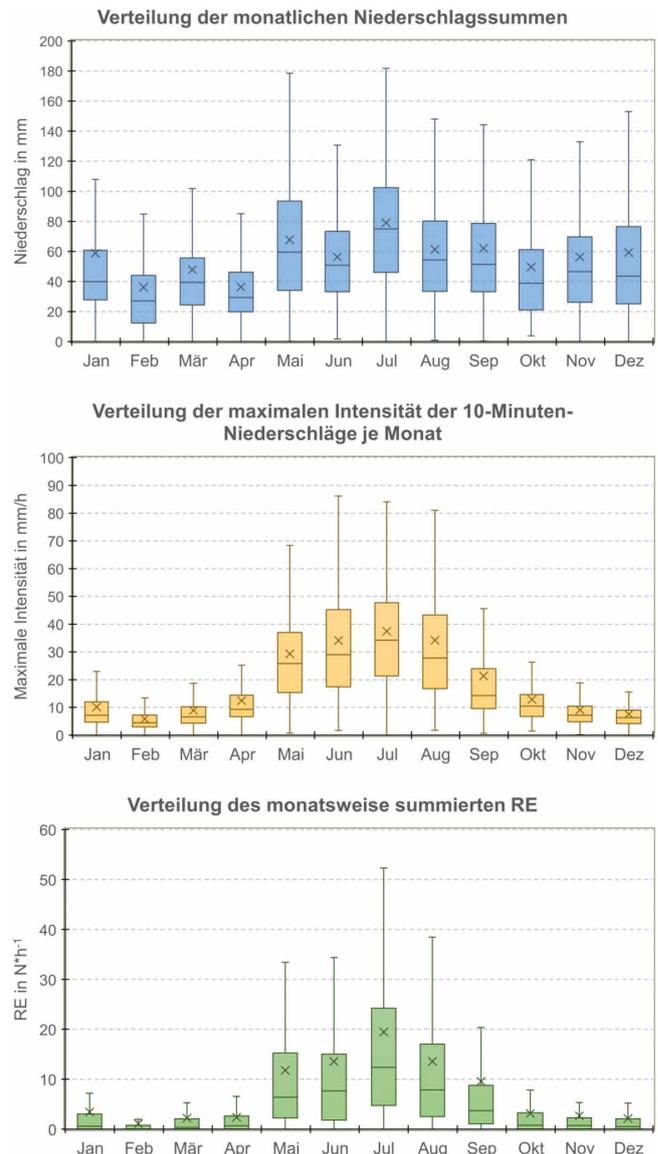
Die Modellvalidierung wurde mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt. In der ersten Validierungsmethode wurden, auf Grundlage der durch die Änderungssignale der 14 Klimamodellketten modifizierten Messreihen, Zukunft-R-Faktoren nach Normvorschrift berechnet und stationsweise gemittelt. Der daraus ermittelte Änderungsfaktor des R-Faktors wurde für alle Klimamodellketten, jeweils für die Nahe und Ferne Zukunft, mit der Schätzung der RG2 verglichen und die Modellgüte bestimmt.

Für die zweite Validierungsvariante wurden Stationen untersucht, die eine durchgehende Zeitreihe von mindestens 20 Jahren aufwiesen. Hierfür wurden die innerhalb des Untersuchungsgebiets liegenden Stationen 1, 5 und 6 verwendet. Zwar waren die Stationen bereits zur Aufstellung von RG2 verwendet worden, jedoch mit abweichenden Änderungsfaktoren. Weiterhin wurden die Station 10 sowie die weiter entfernt liegenden Stationen Leipzig/Halle, Magdeburg und Leinefelde mit einbezogen, die die Gültigkeit von RG2 auch außerhalb des Untersuchungsgebiets nachweisen sollten. Die Zeitreihen dieser Stationen wurden jeweils in zwei etwa gleich große Zeiträume unterteilt und zwischen ihnen der Änderungsfaktor der mittleren Monatssummen bestimmt. Diese Änderungsfaktoren wurden in die RG2 eingesetzt und die sich ergebenden R-Faktor-Änderungen mit den nach Normvorschrift berechneten R-Faktor-Änderungen verglichen. Gegenüber der Validierungsmethode 1 wurde auf diese Weise auch die Anwendbarkeit der Gleichung unter Zugrundelegung variierender zeitlicher Strukturen, d. h. variierende Verhältnisse aus Niederschlagshäufigkeiten und -intensitäten, überprüft.

### 3 Ergebnisse

#### Niederschlagsmenge, -intensität und Erosivität der Niederschlagsmessreihen

Der mittlere R-Faktor der für den Landkreis Mansfeld-Südharz repräsentativen Niederschlagsstationen 1 bis 9 (Tab.1) beträgt  $77,1 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$  (N – Newton). Im Stationsmittel traten im Untersuchungszeitraum pro Jahr zwischen 5 und 38 (Mittelwert 18) erosive Niederschlagsereignisse mit einer maximalen 30-Minuten-Intensität von bis zu  $106 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$  und einer Dauer der Ereignisse von bis zu 200 Minuten auf. Der R-Faktor variiert je nach Station von minimal  $57,0 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$  bis maximal  $93,3 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, schwanken die Mediane der monatlichen Niederschlagssummen innerhalb eines Jahres je nach Station von minimal 25 bis 40 mm in den Monaten Februar bis April und von maximal 60 bis 75 mm in den Monaten Mai und Juli (Abb. 4). Die maximale Intensität, die für alle 10-Min-Niederschlagsereignisse innerhalb eines Monats bestimmt wurde, zeigt eine innerjährliche Verteilung mit höheren Werten in den Sommermonaten Mai bis September. Für Juli beträgt der Median der maximalen Intensität  $35 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$ . Im Gegensatz dazu lag diese im Februar bei ca.  $5 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$ . Eine ähnliche Verteilung zeigt auch der monatliche RE. Die höchsten RE treten von Mai bis September auf, wobei der Monat Juli sowohl den höchsten Median ( $12 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$ ) als auch das höchste Maximum ( $52 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$ ) aufweist. Von Oktober bis April liegen die monatlichen Mediane der RE zwischen 1 und  $3 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$ . Bezogen auf den R-Faktor tragen die Monate Mai bis September zu ca. 80 % zum jährlichen R-Faktor bei.



**Abbildung 4** Verteilung der für den R-Faktor relevanten klimatischen Parameter im LK Mansfeld-Südharz, Stationen 1 bis 17 (ohne Darstellung der Ausreißer). Oben: monatliche Niederschlagssummen. Mitte: maximale Intensität der 10-Minuten-Niederschläge je Monat. Unten: monatsweise summierter RE (R-Faktor der Einzelergebnisse).  
*Distribution of climatic parameters relevant to the R-factor in the district of Mansfeld-Südharz, stations 1 to 17 (without representation of outliers). Upper: monthly precipitation sums. Middle: maximum intensity of the 10-minute precipitation per month. Lower: monthly summed RE (R-factor of the single rainfall events).*

#### Gütevergleich der ST- und MS-Gleichung mit Regressionsgleichung 1

Die farblichen Markierungen in Tabelle 3 zeigen gehäuft negative und stark streuende Abweichungen von -28 % bis +11 % (im Mittel -11 %) zwischen den R-Faktoren der ST-Gleichung und den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren. Der Korrelationskoeffizient der ST-Formel von 0,64 zeigt einen mäßig robusten Zusammenhang von Sommerhalbjahresniederschlag und R-Faktor. Die R-Faktoren der MS-Gleichung streuen mit -19 % bis +26 % geringfügig mehr, während die mittlere Abweichung bei 0 bis 1 % liegt.

**Tabelle 3**  
 Sommerhalbjahresniederschlagssumme ( $P_{So}$ ) und mittlere prozentuale Anteile der  $P_{So}$  an der Jahresniederschlagssumme  $P_{Jahr}$  der Stationen 1 bis 17 sowie nach Normvorschrift DIN 19708 (2017) berechnete R-Faktoren im Vergleich zu den R-Faktoren nach der Länderregressionsgleichung für Sachsen-Anhalt (ST-Gleichung), der Gleichung für Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) und der RG1 sowie die prozentualen Abweichungen (Proz. Abw.) zum nach DIN berechneten R-Faktor. Negative Abweichungen über 10 % sind blau markiert, über 25 % dunkelblau, positive Abweichungen über 10 % sind orange, über 25 % mit dunkelorange markiert. Unten: Güteparameter der RG1 für die Modellerstellung und Validierung.  
*Sum of summer half-year precipitation ( $P_{So}$ ) and mean percentage of  $P_{So}$  in the sum of annual precipitation  $P_{Jahr}$  of stations 1 to 17 as well as R-factors calculated according to the standard DIN 19708 (2017) in comparison to the R-factors according to the state regression equation for Saxony-Anhalt (ST-Gleichung), the equation for Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) and RG1 as well as the percentage deviations (Proz. Abw.) from the R-factor calculated according to DIN. Negative variances above 10 % are marked in blue, above 25 % in dark blue, positive variances above 10 % are marked in orange, above 25 % in dark orange. Below: quality parameters of modelling and validation.*

Stationen	$P_{So}$ mm	$P_{So}/P_{Jahr}$ –	R-Faktor (DIN) $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	ST- Gleichung $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. –	MS- Gleichung $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. –	RG1 $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. –
Station 1	356	54 %	73,9	68,8	-7 %	76,8	4 %	73,7	0 %
Station 2	374	60 %	88,3	73,9	-16 %	81,3	-8 %	83,5	-5 %
Station 3	351	65 %	93,3	67,4	-28 %	75,5	-19 %	79,3	-15 %
Station 4	398	56 %	85,5	80,5	-6 %	87,2	2 %	84,8	-1 %
Station 5	336	57 %	57,0	63,3	11 %	71,9	26 %	70,9	24 %
Station 6	313	62 %	76,3	56,7	-26 %	66,0	-13 %	68,2	-11 %
Station 7	330	63 %	64,6	61,5	-5 %	70,3	9 %	72,7	12 %
Station 8	346	64 %	73,2	66,1	-10 %	74,3	2 %	75,2	3 %
Station 9	375	50 %	81,5	74,2	-9 %	81,6	0 %	77,6	-5 %
Station 10	341	64 %	80,0	64,6	-19 %	73,0	-9 %	76,8	-4 %
Station 11	342	66 %	79,6	64,9	-19 %	73,3	-8 %	77,0	-3 %
Station 12	333	64 %	69,6	62,3	-11 %	71,0	2 %	74,1	6 %
Station 13	353	62 %	88,7	68,0	-23 %	76,0	-14 %	77,8	-12 %
Station 14	290	61 %	52,2	50,4	-4 %	60,4	16 %	63,6	22 %
Station 15	342	61 %	69,3	65,0	-6 %	73,4	6 %	74,1	7 %
Station 16	368	50 %	68,8	72,2	5 %	79,8	16 %	76,7	11 %
Station 17	320	63 %	69,2	58,7	-15 %	67,8	-2 %	71,8	4 %
MW (1-9)	<b>353</b>	58 %	<b>77,1</b>	<b>68,0</b>	<b>-11 %</b>	<b>76,1</b>	<b>0 %</b>	<b>76,2</b>	<b>0 %</b>
MW (10 - 17)	<b>336</b>	61 %	<b>72,2</b>	<b>63,2</b>	<b>-11 %</b>	<b>71,8</b>	<b>1 %</b>	<b>74,0</b>	<b>4 %</b>
Korrelationskoeffizient (1-17)				<b>0,64</b>		<b>0,64</b>		<b>0,80</b>	
RMSE (1-17)				<b>12,24</b>		<b>8,37</b>		<b>7,43</b>	
Güteparameter der Modellerstellung (auf Basis von Stationsjahren):						Multipler Korrelationskoeffizient			<b>0,72</b>
						Adjustiertes Bestimmtheitsmaß			<b>0,50</b>
Güteparameter der Modellvalidierung (auf Basis von Stationsjahren):						Gesamt Korrelationskoeffizient			<b>0,69</b>
						Gesamt Bestimmtheitsmaß			<b>0,48</b>

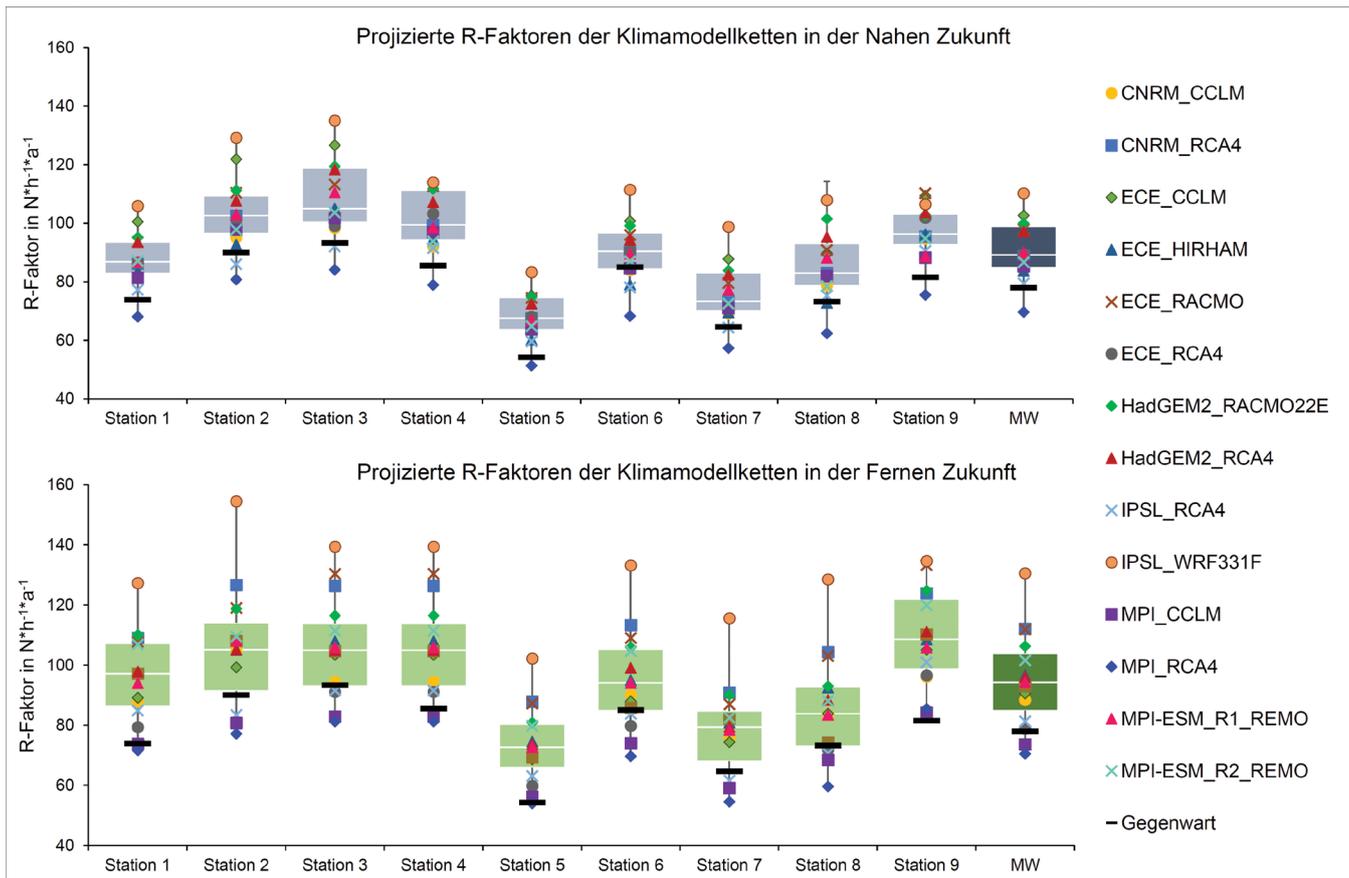
Der Korrelationskoeffizient von 0,64 weist ebenfalls auf einen mäßig robusten Zusammenhang bei kleinerem RMSE hin. Tendenziell führt die MS-Gleichung verglichen mit der Normvorschrift bei unterdurchschnittlichen Jahresniederschlagssummen (< 605 mm) (Tab. 1) zu einer Unterschätzung des R-Faktors und bei überdurchschnittlichen Jahresniederschlagssummen (> 605 mm) zu einer Überschätzung des R-Faktors.

Im unteren Bereich der Tabelle 3 werden die Güteparameter der Modellerstellung und -validierung zusammengefasst. Die RG1 wurde auf Basis von insgesamt 266 Stationsjahren erstellt, um gegenüber den nur in geringerer Zahl vorhandenen Stationsmitteln ihre Robustheit zu erhöhen. Der multiple Korrelationskoeffizient zeigt mit 0,72 eine mittlere bis hohe Modellgüte in der Modellerstellung bei einem moderaten adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,5. Der Gesamt-Korrelationskoeffizient und das Gesamt-Bestimmtheitsmaß beziehen sich auf den gemeinsamen Erstellungs- und Validierungszeitraum und liegen

geringfügig unter den Werten im Erstellungszeitraum. In der Anwendung liegen die Abweichungen der stationsweise gemittelten R-Faktoren der RG1 zu den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren zwischen -15 % und 24 %, im Mittel bei 0 % (Modellerstellungsstation 1 bis 9) und 4 % (Validierungsstation 10 bis 17). Im Vergleich zur ST- und MS-Gleichung sind mit der RG1 insgesamt bessere Übereinstimmungen zu erzielen, welches an den geringeren Streuungen und dem vergleichsweise hohen Korrelationskoeffizienten von 0,8 deutlich wird.

**Projizierte R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft**

Die R-Faktoren der NZ liegen je nach Station in einem Bereich zwischen 51 und 135  $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$  und in der FZ zwischen 54 und 155  $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$  (Abb. 5). Im Mittel über die Stationen 1 bis 9 ergibt sich ein R-Faktor von 90  $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$  für die NZ und von 95  $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$  für die FZ. Im Vergleich dazu liegt an den meisten Stationen der gegenwärtige R-Faktor (Abb. 5 – schwarze Linie) unterhalb des 25%-Quantils der Klimamodelle, im Mittel der Stationen bei



**Abbildung 5**

Boxplot der nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren der Stationen 1 bis 9 und Stationsmittel für die 14 untersuchten Klimamodelle und die Gegenwart. Oben: Nahe Zukunft (2021–2050). Unten: Ferne Zukunft (2071–2100).

Boxplot of the R-factors calculated according to the standard specification of stations 1 to 9 and station mean for the 14 climate models and the present. Upper: Near future (2021–2050). Lower: Far future (2071–2100).

77 N\*h<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>. Die mittlere Änderung von der Gegenwart zur NZ beträgt durchschnittlich 17 % und zur FZ 22 %. Das Klimamodell mit der höchsten Änderung (IPSL\_WRF331F) projiziert eine Abweichung in die NZ von durchschnittlich 41 % und in die FZ von 67 %.

Nur eine Klimamodellkette projiziert mit -11 % eine Abnahme des R-Faktors in der nahen Zukunft (MPI\_RCA4). Eine Verringerung des R-Faktors in der FZ ist bei den Modellketten MPI\_CCLM und MPI\_RCA4 (im Mittel -6 % bzw. -10 %) festzustellen.

Im Vergleich dazu wird eine Erhöhung der Jahresniederschlagssumme bzw. der Sommerhalbjahresniederschlagssumme (gemittelt über die Stationen 1 bis 9 und alle Klimamodelle) von der Gegenwart zur NZ von im Mittel 7 % (Jahr) bzw. 5 % (Sommer) (Maximum 14 % bzw. 14 %) und von der Gegenwart zur FZ von 13 % bzw. 5 % (Maximum 24 % bzw. 23 %) projiziert (nicht dargestellt).

**Gütevergleich der Ergebnisse der MS-Gleichung und RG1 mit Regressionsgleichung 2**

In Tabelle 4 (Validierung 1) kann sowohl für die R-Faktoren der MS-Gleichung als auch der RG1 an fast allen Stationen eine negative Abweichung, d. h. Unterschätzung des nach Normvorschrift berechneten Zukunft-R-Faktors, festgestellt werden. Die

Güteparameter beider Gleichungen liegen trotz der Unterschätzung im mittleren bis hohen Bereich, wobei mit zunehmender Korrelation zur FZ ebenfalls der RMSE ansteigt. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der RG2 eine sehr hohe Übereinstimmung mit den nach Normvorschrift ermittelten R-Faktoren, sowohl für die NZ als auch FZ. Lediglich Station 6 weist mit > 10 % geringfügig stärkere Abweichungen auf. Die hohe Güte zeigt sich auch in der mittleren prozentualen Abweichung von ca. 1 %. Der Korrelationskoeffizient der RG2 weist mit Werten von 0,96 bzw. 0,95 bei einem RMSE von 4,8 bzw. 7,3 die beste Anpassung an den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren auf.

In Tabelle 5 (Validierung 2) sind für die beiden untersuchten Messzeiträume vergleichsweise hohe Variationen der R-Faktoren von bis zu 16 N\*h<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> festzustellen. Grundsätzlich nehmen die R-Faktoren nach Normvorschrift an allen Stationen mit Ausnahme von Halle-Kröllwitz von Zeitraum 1 (ZR 1) zu Zeitraum 2 (ZR 2) zu. Eine Zunahme ergibt sich mittels RG2 auch bei 5 der 7 Stationen, wobei die Differenz zu den R-Faktoren nach Normvorschrift bei weniger als 10 N\*h<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> liegt (Ausnahme bilden die Stationen Halle-Kröllwitz und Leipzig/Halle). Diese 5 Stationen weisen auch eine gute Übereinstimmung der Änderungsfaktoren (ÄF) auf, mit äußerst geringen Abweichungen an der Station Harzgerode (welche auch für die Kalibrierung der RG2 verwendet wurde) und an der Station Leinefelde. Die nach Normvorschrift

**Tabelle 4**  
 Ergebnisse der Regressionsgleichungen (MS-Gleichung, RG1, RG2) in der Nahen Zukunft (NZ: 2021 bis 2050) und Fernen Zukunft (FZ: 2071 bis 2100) als Mittelwert über alle Klimamodelle im Vergleich zu dem nach Normvorschrift berechneten R-Faktor (DIN) aus projizierten Niederschlagsdaten. Oben: Mittelwert der Stationen 1–9 (farbliche Markierung siehe Tab. 3). Unten: Mittelwert der Stationen; Güteparameter (MW = Mittelwert, KK = Korrelationskoeffizient).  
 Results of the regression equations (MS-equation, RG1, RG2) in the Near Future (NZ: 2021 to 2050) and Far Future (FC: 2071 to 2100) as mean value over all climate models in comparison with the R-factor calculated according to DIN from projected precipitation data. Upper: Mean value of Stations 1–9 (coloured markings see Tab. 3). Lower: mean value of the stations; Quality parameters (MW = mean value, KK = correlation coefficient).

Station	Zeitraum	P <sub>Jahr</sub>	R-Faktor (DIN)	MS-Gleichung	Proz. Abw.	RG1	Proz. Abw.	RG2	Proz. Abw.
		mm	N*h <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>	N*h <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>	–	N*h <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>	–	N*h <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>	–
Station 1	Nahe Zukunft	705	87,7	81,6	-6 %	77,8	-11 %	86,7	-1 %
	Ferne Zukunft	752	95,5	82,7	-12 %	76,6	-19 %	91,3	-5 %
Station 2	Nahe Zukunft	668	102,7	86,3	-15 %	88,0	-14 %	105,6	3 %
	Ferne Zukunft	705	105,2	86,7	-16 %	86,6	-16 %	111,2	6 %
Station 3	Nahe Zukunft	579	107,8	80,2	-25 %	83,6	-22 %	109,4	2 %
	Ferne Zukunft	608	106,2	80,6	-23 %	82,5	-22 %	115,2	8 %
Station 4	Nahe Zukunft	760	100,5	92,5	-7 %	89,4	-11 %	100,3	0 %
	Ferne Zukunft	808	106,2	93,4	-11 %	88,0	-16 %	105,6	-1 %
Station 5	Nahe Zukunft	631	67,6	76,3	14 %	74,8	11 %	63,6	-6 %
	Ferne Zukunft	668	73,5	77,1	7 %	73,6	1 %	67,0	-9 %
Station 6	Nahe Zukunft	540	89,5	70,1	-21 %	72,0	-19 %	99,8	11 %
	Ferne Zukunft	568	95,7	70,7	-25 %	71,0	-25 %	105,0	10 %
Station 7	Nahe Zukunft	560	75,5	74,6	0 %	76,7	2 %	75,8	1 %
	Ferne Zukunft	588	77,8	75,1	-1 %	75,5	-1 %	79,8	3 %
Station 8	Nahe Zukunft	574	84,9	79,0	-6 %	79,3	-5 %	85,9	2 %
	Ferne Zukunft	603	87,1	79,6	-7 %	78,2	-9 %	90,5	4 %
Station 9	Nahe Zukunft	814	97,0	86,7	-10 %	81,9	-15 %	95,7	-1 %
	Ferne Zukunft	873	109,3	87,8	-19 %	80,7	-25 %	100,7	-8 %
Gesamt	NZ (MW)	<b>648</b>	<b>90,3</b>	<b>80,8</b>	<b>-9 %</b>	<b>80,4</b>	<b>-9 %</b>	<b>91,4</b>	<b>1 %</b>
	FZ (MW)	<b>686</b>	<b>95,2</b>	<b>81,5</b>	<b>-12 %</b>	<b>79,2</b>	<b>-15 %</b>	<b>96,3</b>	<b>1 %</b>
	NZ (KK)			<b>0,68</b>		<b>0,82</b>		<b>0,96</b>	
	FZ (KK)			<b>0,82</b>		<b>0,84</b>		<b>0,95</b>	
	NZ (RMSE)			<b>14,9</b>		<b>14,2</b>		<b>4,8</b>	
	FZ (RMSE)			<b>18,8</b>		<b>20,1</b>		<b>7,3</b>	

**Tabelle 5**  
 Nach Normvorschrift (DIN) und nach RG2 berechnete R-Faktoren und Änderungsfaktoren des R-Faktors für die Stationen 1, 5, 6, 10 sowie für 3 weiter entfernte Stationen aus gemessenen Daten (ZR = Zeitraum; N. = Niederschlag; ÄF = Änderungsfaktor).  
 R-factors and change factors of the R-factor calculated according to standard specification (DIN) and RG2 for stations 1, 5, 6, 10 and for 3 other distant stations from measured data (ZR = time period; N. = precipitation, ÄF - change factor).

	Station 1 Siptenfelde Sachsen-Anhalt 22 Jahre	Station 5 Harzgerode Sachsen-Anhalt 27 Jahre	Station 6 Artern Thüringen 24 Jahre	Station 10 Halle-Kröllwitz Sachsen-Anhalt 21 Jahre	zus. Station Leipzig/Halle Sachsen 22 Jahre	zus. Station Magdeburg Sachsen-Anhalt 26 Jahre	zus. Station Leinefelde Thüringen 26 Jahre
Zeitraum 1 (ZR 1)	1997 – 2007	1992 – 2004	1995 – 2006	1994 – 2003	1998 – 2008	1994 – 2006	1994 – 2006
Zeitraum 2 (ZR 2)	2008 – 2018	2005 – 2018	2007 – 2018	2004 – 2014	2009 – 2019	2007 – 2019	2007 – 2019
N. (Jahr/So.) (ZR 1)	638/283	587/276	500/268	499/276	539/298	495/250	716/327
N. (Jahr/So.) (ZR 2)	676/352	590/307	501/292	536/307	516/294	524/284	680/335
R-Faktor (DIN) (ZR 1)	65,9	51,1	68,2	71,7	75,8	53,3	73,4
R-Faktor (DIN) (ZR 2)	81,9	62,5	69,9	63,9	81,5	66,2	76,8
R-Faktor (RG2) (ZR 2)	89,2	61,4	78,8	95,7	74,2	70,7	75,7
Diff. R-Faktoren (ZR 2)	7,3	-1,1	8,9	31,8	-7,3	-4,5	1,1
ÄF R-Faktor (DIN)	1,24	1,22	1,02	0,89	1,08	1,24	1,05
ÄF R-Faktor (aus RG2)	1,35	1,20	1,16	1,33	0,98	1,33	1,03

berechnete Reduktion des R-Faktors ( $\dot{A}F = 0,89$ ) an der Station Halle-Kröllwitz kann durch die RG2 nicht wiedergegeben werden. Hier wird mit der RG2 eine Zunahme ( $\dot{A}F = 1,33$ ) bei einer vergleichsweise hohen Differenz der R-Faktoren von  $32 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$  ermittelt. An der Station Leipzig/Halle wird für die nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren eine leichte Zunahme ermittelt ( $\dot{A}F = 1,08$ ), während sich aus der RG2 eine Abnahme des R-Faktors ( $\dot{A}F = 0,98$ ) ergibt. Die Differenz der R-Faktoren ist jedoch mit  $7 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$  gering.

#### 4 Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es, verbesserte und einfach anzuwendende Methoden zur Abschätzung zukünftiger R-Faktoren zu entwickeln sowie zu validieren. Dazu wurden zunächst die R-Faktoren der Gegenwart analysiert (Tab. 1) sowie die jährliche Verteilung einiger für die Berechnung des R-Faktors relevante klimatische Kennwerte dargestellt (Abb. 4). Die Spanne der R-Faktoren der untersuchten Stationen verdeutlicht, dass erosive Niederschlagsereignisse (und damit auch die R-Faktoren) einer räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen. Dies gilt auch für benachbarte Stationen, wie z. B. die Stationen 1 (Siptenfelde) und 5 (Harzgerode), die nur ca. 5 km auseinanderliegen, sich im R-Faktor jedoch um  $17 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$  unterscheiden. Diese große Differenz ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Zeitreihenlängen zurückzuführen. Jedoch unterscheiden sich die mittleren jährlichen Niederschlagssummen beider Stationen signifikant voneinander (im Zeitraum 1997 bis 2018: 657 mm in Siptenfelde, 589 mm in Harzgerode), sodass ein abweichendes Niederschlagsregime ebenfalls eine mögliche Ursache darstellen könnte. Auch innerjährlich schwanken die R-Faktoren der Einzelereignisse (RE), wie in Abbildung 4 deutlich wird. Die RE sind in den Monaten Mai bis September am höchsten und tragen somit maßgeblich zur Jahreserosivität bei, welches sich auch mit den Untersuchungen von BALLABIO et al. (2017) und üblichen Regressionsansätzen, die das Sommerhalbjahr als Grundlage verwendeten, deckt. Dies begründet auch die Wahl der Regressoren der Regressionsgleichungen 1 und 2. Die ähnliche innerjährliche Verteilung der maximalen Intensität und RE verdeutlicht den starken Einfluss der Niederschlagsintensität auf den R-Faktor. Daraus leitet sich ab, dass man mit Regressionsgleichungen auf Basis von mittleren Niederschlagssummen den R-Faktor häufig nur mit Unsicherheiten abschätzen kann (LEE & HEO, 2011).

Die Unsicherheit von linearen Regressionsgleichungen mit der mittleren Sommerhalbjahressumme als Regressor wird in Tabelle 3 deutlich. Die R-Faktoren des Landkreises Mansfeld-Südharz werden durch die ST-Gleichung im Vergleich zu den R-Faktoren nach Normvorschrift deutlich unterschätzt. Dies ist auch auf die Verwendung von unterschiedlichen Zeitreihen und Stationen in der Modellerstellung zurückzuführen. Trotz der regionalen Modellanpassung auf Grundlage aktueller Zeitreihen kann für die MS-Gleichung zwar der mittlere Fehler reduziert, jedoch aufgrund der verbliebenen Streuung der R-Faktor-Abweichungen nur geringe Güteverbesserungen erzielt werden. Die beste Übereinstimmung mit den R-Faktoren nach Normvorschrift wird mit der neu entwickelten RG1 festgestellt. Die Nutzung von Regressionsgleichungen auf Grundlage von mittleren monatlichen Niederschlagssummen der Sommermonate Mai bis September führt damit zu einer robusteren Abschätzung der R-Faktoren gegenüber den üblichen Regres-

sionsgleichungen auf Basis der Jahres- bzw. Sommerniederschlagssummen entsprechend der DIN 19708 (2017). Da der R-Faktor vor allem lokal sehr stark variiert, sind für eine robuste Schätzung grundsätzlich regional angepasste Gleichungen empfehlenswert (z. B. auf Landkreisebene). Hierfür eignen sich auch vorhandene räumlich hochaufgelöste Regenerosivitätskarten (AUERSWALD et al., 2019a). Sowohl Regenerosivitätskarten als auch Regressionsgleichungen sind jedoch auf Grund des sich wandelnden Klimas nur für den Zeitraum der Erstellung und in begrenztem Maße darüber hinaus gültig, welches eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich macht. Um eine Unterschätzung der R-Faktoren (durch klimawandelbedingte Erhöhungen der Niederschläge) für Planungsfragestellungen zu vermeiden, wurde in der Regenerosivitätskarte nach AUERSWALD et al. (2019b) eine pauschale Erhöhung des projizierten R-Faktors in ganz Deutschland um 27 % (bei Verwendung des Zentraljahres 2025) vorgenommen. Um den R-Faktor der Gegenwart robust abschätzen zu können, welcher in der RG2 für die Schätzung eines zukünftigen absoluten R-Faktors möglichst genaue R-Faktoren der Gegenwart benötigt, ist eine regelmäßige Anpassung der Regenerosivitätskarte weiterhin notwendig. Das Erstellen und die Bereitstellung einer neuen Regenerosivitätskarte aus Radarniederschlagsdaten ist dabei grundsätzlich aufwendiger als das Aufstellen einer neuen Regressionsgleichung, welches vermutlich größere zeitliche Abstände zwischen den Aktualisierungen der Regenerosivitätskarte zur Folge haben wird. Hier kann die RG1 eine Übergangslösung darstellen, da sie eine einfache Anpassung ermöglicht.

Die Ergebnisse der projizierten R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft (Abbildung 3) zeigen über die Nahe zur Fernen Zukunft eine fortschreitende Erhöhung der R-Faktoren, wobei diese anteilig stärker zunehmen als der Niederschlag. Eine Unsicherheitsquelle liegt in der zeitlichen Abweichung aus dem Referenzzeitraum zur Validierung bzw. Berechnung zukünftiger R-Faktoren (1992 bzw. 2007 bis 2018) und der Vergangenheit des Klimamodellensembles (1981 bis 2010). Der Referenzzeitraum weist in den Sommermonaten grundsätzlich höhere, in den Wintermonaten grundsätzlich niedrigere Niederschlagssummen auf als der Vergangenheitszeitraum des Klimamodellensembles. Da der Referenzzeitraum bereits weiter in der Zukunft liegt als die Vergangenheit des Ensembles, kann eine Überschätzung der Änderungsfaktoren und folglich der R-Faktoren nicht ausgeschlossen werden. Da keine hochaufgelösten Messreihen für die weiter zurückliegende Vergangenheit zur Verfügung stehen, sollte in zukünftigen Untersuchungen in Betracht gezogen werden, den Vergangenheitszeitraum des Klimamodellensembles entsprechend anzupassen (z. B. auf den neuen Referenzzeitraum der WMO 1991 bis 2020).

Mit der RG2 wurde durch Verwendung von relativen monatlichen Niederschlagsänderungen eine Möglichkeit untersucht, die Unsicherheiten, die sich durch die Verwendung absoluter Niederschlagssummen ergeben, zu reduzieren. Tabelle 4 zeigt, dass die auf Absolutwerten basierenden Regressionsgleichungen (MS-Gleichung & RG1) den nach Normvorschrift berechneten, zukünftigen R-Faktor tendenziell unterschätzen und eine sich ändernde Charakteristik des Niederschlags nur unzureichend wiedergeben. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von AUERSWALD et al. (2019b), ELHAUS et al. (2019) bzw. FISCHER et al. (2020). Im Gegensatz dazu zeigt die auf relative Niederschlagsänderungen beruhende RG2 eine sehr hohe Überein-

stimmung mit den R-Faktoren nach Normvorschrift ( $KK = 0,96$ ), welches auf die robustere Abbildung von R-Faktoränderungen hindeutet. Jedoch ist anzumerken, dass die Erzeugung der hochaufgelösten, synthetischen Zukunftsreihen ausschließlich durch Adjustierung mittels monatlicher Klimaänderungsfaktoren erfolgte. Dies ist eine vereinfachende Methode, bei der die Verteilung erosiver Niederschlagsereignisse weitestgehend konstant bleibt und daher die Aussagefähigkeit der Ergebnisse der RG2 auf wenig komplexe Änderungen der Niederschlagsstatistik einschränkt. Da von vorneherein eine erhöhte Güte durch ein auf Niederschlagsänderungen basierendes Modell zu erwarten war (da ermittelte Klimareihen der Zukunft ebenso auf Basis von Änderungssignalen ermittelt wurden), wurde in einem zweiten Validierungsverfahren geprüft, ob die RG2 auch in der Lage ist, R-Faktoränderungen im Messzeitraum wiederzugeben (Tab. 5). Grundsätzlich kann für 5 der 7 untersuchten Stationen eine gute Übereinstimmung zwischen den nach Normvorschrift und nach RG2 berechneten R-Faktoren ermittelt werden. Diese gilt sowohl für die Stationen aus der Kalibrierung (Siptenfelde, Harzgerode und Artern) als auch für zusätzliche, weiter außerhalb liegende Stationen. Dabei sind die Differenzen der R-Faktoren immer dort gering, wo ansteigende Niederschläge auch einen ansteigenden R-Faktor zur Folge haben. Im Gegensatz dazu ist die Übereinstimmung an der Station Halle-Kröllwitz unzureichend, wo bei ansteigenden Jahres- und Sommerhalbjahressummen ein Absinken des nach Normvorschrift berechneten R-Faktors zu beobachten ist. Es ist anzunehmen, dass der Niederschlag vermehrt als nicht erosiver Niederschlag gefallen war. Gegenteiliges wurde für die Station Leipzig/Halle festgestellt, wo bei sinkenden Jahres- und Sommerhalbjahressummen nach Normvorschrift ein ansteigender R-Faktor ermittelt wurde. Dies zeigt, dass die RG2 nur positive Korrelationen zwischen Niederschlag und R-Faktor abbilden kann. Dies ist verfahrensbedingt auf die Verwendung von adjustierten Niederschlagsreihen des Klimamodellensembles zur Berechnung des zukünftigen R-Faktors zurückzuführen. Des Weiteren sind die Untersuchungszeiträume mit 10 bis max. 13 Jahren für die Ermittlung eines mittleren R-Faktors vergleichsweise kurz. Da der Jahres-R-Faktor hohen Schwankungen unterliegt, beeinflussen die Einbeziehung oder das Herausnehmen eines einzelnen Jahres das Ergebnis. Zur Überprüfung der Validierungsergebnisse sollte die Auswertung zukünftig mit längeren und robusteren Zeiträumen von 15 bis 20 Jahren durchgeführt werden. Ebenso sind alternative Ansätze denkbar, die auf disaggregierten Niederschlägen oder auf aus Niederschlagsstatistiken synthetisch erzeugten Regenreihen mit hoher zeitlicher Auflösung und ausreichender Länge basieren. Die Anwendbarkeit der RG2 war zudem auf den Wertebereich der im Latin Hypercube Sampling vorgegebenen Klimaänderungsfaktoren beschränkt. Die Genauigkeit der R-Faktoren weit außerhalb dieses Bereiches konnte aktuell nicht abgeschätzt werden.

Der Vorteil der RG2 beruht vor allem auf ihrer einfachen Anwendbarkeit. Neben den monatlichen Niederschlagsänderungsfaktoren, welche durch aktuelle Klimamodellprojektionen vorgegeben werden können, wird zur Abschätzung eines Absolutwerts des zukünftigen R-Faktors nur ein möglichst robust ermittelter R-Faktor der Gegenwart benötigt. Dieser kann entweder durch regional angepasste Regressionsgleichungen, wie RG1, oder durch eine Regenerositätskarte ermittelt werden. Insbesondere die Kombination aus der hochaufgelösten Karte der Regenerosität ( $1 \times 1 \text{ km}$ ) und den Gitterabmessungen der Klima-

modelle ( $10 \times 10 \text{ km}$ ) erhöht die Robustheit bei der lokalen Abschätzung eines zukünftigen R-Faktors. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch die alleinige Verwendung von Niederschlagsänderungssignalen keine vorgelagerten Bias-Korrekturen notwendig sind. Dadurch wird die Ensemble-Anwendung vereinfacht. Durch die ausschließliche Bestimmung von R-Faktoränderungen und die Entkopplung ihrer Absolutwertbestimmung vom Verfahren, können die darin liegenden Fehler mittels vorliegender, hochaufgelöster Messreihen und der anwendbaren Methodik nach Normvorschrift reduziert werden. Als Konsequenz daraus wirken sich die damit üblicherweise verbundenen Unsicherheiten nicht negativ auf das Regressionsmodell aus.

Unter Berücksichtigung der diskutierten Unsicherheiten und Anwendungsgrenzen ist von einer Anwendbarkeit der aufgestellten RG1 und RG2 in der Erosionsberechnung auszugehen.

## 5 Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie war es, die aus der DIN 19708 (2017) stammende, häufig verwendete länderspezifische Gleichung für das Land Sachsen-Anhalt (ST-Gleichung) hinsichtlich ihrer Berechnungsgenauigkeit für den Landkreis Mansfeld-Südharz zu prüfen und alternative, praxistaugliche Regressionsmodelle zur Berechnung gegenwärtiger und zukünftiger R-Faktoren zu validieren.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sowohl die ST-Gleichung als auch die auf den Messzeitraum angepasste Gleichung für den Landkreis Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) den lokalen R-Faktor nur mit Unsicherheiten wiedergeben konnten. Grundsätzlich ist die Regressionsgleichung 1 (RG1), basierend auf den mittleren monatlichen Niederschlagssummen der Monate Mai bis September, zur Abschätzung gegenwärtiger R-Faktoren im Landkreis Mansfeld-Südharz besser geeignet als die Ländergleichung der DIN 19708 (2017). Für eine zuverlässige Schätzung eines lokalen R-Faktors wird daher die Verwendung von Regressionsgleichungen mit monatlichen Niederschlagssummen als Regressoren empfohlen. Da die RG1 jedoch die R-Faktoren außerhalb des Untersuchungszeitraumes nur mit geringer Güte wiedergibt, wurde diese für die Abschätzung der zukünftigen, klimawandelbeeinflussten R-Faktoren als ungeeignet eingeschätzt. Dabei deuten die Ergebnisse des untersuchten Klimamodellensembles auf eine Unterschätzung der R-Faktoren hin.

Durch die Regressionsgleichung 2 (RG2), welche auf den monatlichen Niederschlagsänderungen der Monate Mai bis September basiert, konnte sowohl für den Wertebereich des Klimamodellensembles als auch für die gemessenen Daten eine sehr hohe Modellgüte nachgewiesen werden. Damit zeigt die RG2, dass die Berechnung von R-Faktoränderungen aus Niederschlagsänderungen grundsätzlich zu robusten Abschätzungen eines zukünftigen R-Faktors führt. Aus diesem Grund wird für die Ermittlung von klimawandelbeeinflussten R-Faktoren die Verwendung einer Regressionsgleichung mit relativen monatlichen Niederschlagsänderungen (statt absoluten Niederschlagssummen) als Regressoren empfohlen. Jedoch konnte durch die RG2 nur eine positive Korrelation und nur eingeschränkt die Änderung von Häufigkeiten und Verteilung von Niederschlagsereignissen abgebildet werden.

Verbesserungspotenzial der Regressionsgleichungen wird von den Autoren einerseits in der Regressorenwahl gesehen, wobei

weitere Regressoren, wie die Niederschlagsintensität, geprüft werden sollten. Weiterhin kann die Nutzung nicht linearer Ansätze in Betracht gezogen werden. Für die RG2 sollte insbesondere der Einfluss klimabedingter Niederschlagsänderungen auf Basis komplexerer Änderungen der Niederschlagsstatistiken geprüft werden. Um die Robustheit beider Regressionsmodelle zu verifizieren, können Unsicherheitsbetrachtungen vorgenommen und die Einzel- und Gesamtunsicherheit quantifiziert werden.

## Conclusions

The aim of this study was to examine the commonly used state-specific equation for the state of Saxony-Anhalt (ST equation) from DIN 19708 (2017) with regard to its calculation accuracy for the Mansfeld-Südharz district. Furthermore, alternative, practical regression models for the calculation of current and future R-factors were investigated. The results of the study showed that both the ST equation and the equation for the Mansfeld-Südharz district (MS equation) could only reproduce the local R-factor with uncertainties. Basically, the regression equation 1 (RG1) based on the mean monthly precipitation sums of the months May to September was better suited for estimating current R-factors in the Mansfeld-Südharz district than the country equations of DIN 19708 (2017). For reliable estimation of a local R-factor, the use of regression equations with monthly precipitation totals as regressors are therefore recommended. Since RG1 only reproduced the R-factors outside the study period with low quality, it was assessed as inappropriate for the estimation of future climate change-influenced R-factors. The results of the investigated climate model ensemble indicated an underestimation of the R-factors.

Regression equation 2 (RG2), which was based on the monthly changes in precipitation from May to September, demonstrated very high model quality both for the climate model ensemble and for the measured data. Thus, RG2 showed that the calculation of R-factor changes from precipitation changes basically led to robust estimates of a future R-factor. For this reason, the use of a regression equation with relative monthly precipitation changes (instead of absolute precipitation totals) as regressors is recommended for the determination of R-factors influenced by climate change. However, only a positive correlation and only limited changes in the frequency and distribution of precipitation events could be represented by RG2.

The potential for the improvement of the regression equations is seen by the authors on the one hand in the choice of regressors, whereby further regressors, such as precipitation intensity, should be examined. Furthermore, the use of non-linear approaches can be considered. For RG2, the influence of climate-induced precipitation changes based on more complex changes in precipitation statistics should be examined in particular. In order to verify the robustness of both regression models, uncertainty considerations can be carried out and the individual and total uncertainty quantified.

## Erklärung zur Data Policy

Die Grundlagendaten der Studie sind Niederschlagsdaten des DWD, die vom öffentlichen ftp-Server des DWD bezogen wurden. Die während der aktuellen Studie erzeugten und/oder analysierten Datensätze können auf Anfrage vom Verfasser erhalten werden. Ausgenommen sind die von Drittparteien übernom-

menen Klimamodelldaten, die einer Nichtweiterverbreitungsklausel unterliegen.

## Anschrift der Verfasser

Janine Köhn (M.Eng.)  
 Marcus Beylich (M.Eng.)  
 Prof. Dr. Frido Reinstorf  
 Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit  
 Lehrgebiet Hydrologie und Geographische Informationssysteme  
 Hochschule Magdeburg Stendal  
 Breitscheidstraße 2  
 D-39114 Magdeburg  
 janine.koehn@h2.de  
 marcus.beylich@h2.de  
 frido.reinstorf@h2.de

Prof. Dr. Ralph Meißner  
 Naturwissenschaftliche Fakultät III  
 Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften  
 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
 Julius-Kühn-Straße 23  
 D-06112 Halle (Saale)  
 ralph.meissner@ufz.de

Dr. Holger Rupp  
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ  
 Lysimeterstation  
 Falkenberg 55  
 D-39615 Altmärkische Wische  
 holger.rupp@ufz.de

## Literaturverzeichnis

- ANGULO-MARTÍNEZ, M. & S. BEGUERÍA (2009): Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain), *Journal of Hydrology*, 379 (1–2), 111–121. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.051.
- AUERSWALD, K., FISCHER, F.K., WINTERRATH, T. & R. BRANDHUBER (2019a): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hyrol. Earth Syst. SSci.* 23, 1819–1832. DOI: 10.5194/hess-23-1819-2019.
- AUERSWALD, K., FISCHER, F.K., WINTERRATH, T., ELHAUS, D., MAIER, H. & R. BRANDHUBER (2019b): Klimabedingte Veränderung der Regen-erosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G., König W., Utermann J. (Hrsg.) *Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Loseblattsammlung)*, Berlin, Erich Schmidt Verlag, 4090, 21. S.
- BALLABIO, C., BORRELLI, P., SPINONI, J., MEUSBURGER, K., MICHAELIDES, S., BEGUERÍA, S., KLIK, A., PETAN, S., JANEČEK, M., OLSEN, P., AALTO, J., LAKATOS, M., RYMSZEWCZ, A., DUMITRESCU, A., PERČEC TADIĆ, M., DIODATO, N., KOSTALOVA, J., ROUSSEVA, S., BANASIK, K., ALEWELL, C. & P. PANAGOS (2017): Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 579, 1298–1315. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.123.
- BAGARELLO, V., DI PIAZZA, G.V., FERRO, V. & G. GIORDANO (2008): Predicting unit plot soil loss in Sicily, south Italy. *Hydrological Processes*, 22 (5), pp. 586–595. DOI: 10.1002/hyp.6621.
- BORRELLI, P., ALEWELL, C., ALVAREZ, P., AYACH ANACHE, J.A., BAARTMAN, J., BALLABIO, C., BEZAK, N., BIDDOCCU, M., CERDÀ, A., CHALISE, D., CHEN, S., CHEN, W., DE GIROLAMO, A.M., GESSESSE, G.D., DEUMLICH, D., DIODATO, N., EFTHIMIOU, N., ERPUL, G., FIENER, P., FREPPAZ, M., GENTILE, F., GERICKE, A., HAREGEWEYN, N., HU, B., JEANNEAU, A., KAFFAS, K., KIANI-HARCHEGANI, M., LIZAGA VILLUENDAS, I., LI, C.,

- LOMBARDO, L., LÓPEZ-VICENTE, M., LUCAS-BORJA, M.E., MÄRKER, M., MATTHEWS, F., MIAO, C., MIKOŠ, M., MODUGNO, S., MÖLLER, M., NAI-PAL, V., NEARING, M., OWUSU, S., PANDAY, D., PATAULT, E., PATRICHE, C. V., POGGIO, L., PORTES, R., QUIJANO, L., RAHDARI, M.R., RENIMA, M., RICCI, G.F., RODRIGO-COMINO, J., SAIA, S., SAMANI, A.N., SCHILLACI, C., SYRRIS, V., KIM, H.S., NOSES SPINOLA, D., TARSO OLIVEIRA, P., TENG, H., THAPA, R., VANTAS, K., VIEIRA, D., YANG, J.E., YIN, S., ZEMA, D.A., ZHAO, G. & P. PANAGOS (2021): Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 780, 146494. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146494.
- BELASRI, A. & A. LAKHOULI (2016): Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8, 98–107. DOI: 10.4236/jgis.2016.81010.
- BRANDHUBER, R., AUERSWALD, K., LANG, R., MÜLLER, A. & M. TREISCH (2018): ABAG interaktiv, Version 2.0. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising. Verfügbar auf: [https://www.lfl.bayern.de/appl/abag\\_interaktiv/](https://www.lfl.bayern.de/appl/abag_interaktiv/) (letzter Zugriff am 21.02.2021).
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEIS-TERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & D. WENDI (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61, (3), 150–162. DOI: 10.5675/HyWa\_2017,3\_1.
- BÜRGER, G., PFISTER, A. & A. BRONSTERT (2021): Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 65, (6), 262–271. DOI: 10.5675/HyWa\_2021.6\_1.
- CAO, L., ZHANG, K., DAI, H. & Y. LIANG (2015): Modeling interrill erosion on unpaved roads in the loess plateau of China *Land Degradation and Development*, 26 (8) (2015), pp. 825–832. DOI: 10.1002/ldr.2253.
- DIN 19708:2017-08: Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.
- DIODATO, N. (2004): Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences*. 8. DOI: 10.5194/hess-8-103-2004.
- DWD: Climate Data Center; verfügbar auf: [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/) (Letzter Zugriff: 06.01.2022).
- ELHAUS, D., WINTERRATH, T., AUERSWALD, K., FISCHER, F., EBERTSEDER, F., MAIER, H. & R. BRANDHUBER (2019): Klimawandel und Bodenerosion – Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung. *Bodenschutz* 24: 136–142.
- FISCHER, F., HAUCK, J., BRANDHUBER, R., WEIGL, E., MAIER, H. & K. AUERSWALD (2018): Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72–80. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.03.024.
- FISCHER, F., AUERSWALD, K., WINTERRATH, T. & R. BRANDHUBER (2020): Klimabedingte Zunahme der Regenerosivität seit 1960, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 11/2020, S. 609–613.
- FISTIKOGLU, O. & N.B. HARMANCIOGLU (2002): Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management* 16, 447–467. DOI: 10.1023/A:1022282125760.
- HEILMANN, A., PUNDT, H., SCHEINERT, M., KÖHN, J. & F. REINSTORF (2021): Minderung der Bodenerosion als Maßnahme der kommunalen Klimaanpassung: Einsatz von Modellen und Geoinformationsdiensten auf der Grundlage partizipativer Methoden, *Wernigeröder Automatisierungs- und Informatik-Texte (WAIT)*, Hochschule Harz, Wernigerode. DOI: 10.25673/35860.
- HERNANDO, D. & M. ROMANA (2016): Estimate of the (R)USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain, *Journal of Iberian Geology*, 42, 113–124. DOI: 10.5209/REV\_JIGE.2016.V42.N1.49120.
- HÖLSCHER, J., SCHNORR, C., PETRY, U., ANHALT, M., HABERLANDT, U., PLÖTNER, S., MEON, G., WÖRNER, V. & P. KREYE (2017): Final Report Phase 4 KlibiW, NLWKN, Norden, Deutschland.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II 32 and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 33, IPCC, Geneva, Switzerland.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B. & P. YIOU (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- JUNGHÄNEL, T., BISSOLLI, P., DÄBLER, J., FLECKENSTEIN, R., IMBERY, F., JANSSEN, W., KASPAR, F., LENGFELD, K., LEPPERT, T., RAUTHE, M., RAUTHE-SCHÖCH, A., ROCEK, M., WALAWENDER, E. & E. WEIGL (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet "Bernd" vom 12. bis 19. Juli 2021; Online-Beitrag; DWD; verfügbar auf: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721\\_bericht\\_starkniederschlaege\\_tief\\_bernd.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (Letzter Zugriff: 22.09.2021).
- KIESEL, J., SCHMALZ, B. & N. FOHRER (2009): SEPAL – a simple GIS-based tool to estimate sediment pathways in lowland catchments, *Adv. Geosci.*, 21, 25–32. DOI: 10.5194/adgeo-21-25-2009.
- LEE, J.-H. & J.-H. HEO (2011): Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409 (1–2), 30–48. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.031.
- LEE, M.-H. & H.-H. LIN (2014): Evaluation of Annual Rainfall Erosivity Index Based on Daily, Monthly, and Annual Precipitation Data of Rainfall Station Network in Southern Taiwan. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6), 214708. DOI: 10.1155/2015/214708.
- LOUREIRO, N. & M. AZEVEDO COUTINHO (2001): A New Procedure to Estimate the RUSLE EI30 Index, Based on Monthly Rainfall Data and Applied to the Algarve Region, Portugal. *Journal of Hydrology*. 250. 12–18. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00387-0.
- MCKAY, M.D., BECKMAN, R.J. & W.J. CONOVER (1979): A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics. American Statistical Association*. 21 (2): 239–245. DOI: 10.2307/1268522.
- MEUSBURGER, K., STEEL, A., PANAGOS, P., MONTANARELLA, L. & C. ALEWELL (2012): Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 167–177. DOI: 10.5194/hess-16-167-2012.
- MÖLLER, M. & D. WURBS (2016): DynaC-Schlussbericht, Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Geofernerkundung und Kartographie. Verfügbar auf: [https://www.dropbox.com/s/lwkjvdl8xqk11b/FKZ50EE1230\\_Schlussbericht.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/lwkjvdl8xqk11b/FKZ50EE1230_Schlussbericht.pdf?dl=0).
- MÜHR, B. (2021): Der Übergang zur neuen Bezugsperiode 1991 – 2020 und die klimatologischen Verhältnisse im Jahr 2020 in Deutschland. WGF Report. EDIM. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Verfügbar auf: [https://www.cedim.kit.edu/img/content/WGF\\_Report\\_Neue\\_Bezugsperiode\\_ZFGJahr2020.pdf](https://www.cedim.kit.edu/img/content/WGF_Report_Neue_Bezugsperiode_ZFGJahr2020.pdf).
- SADEGHI, S.H., ZABIHI, M., VAFAKHAH, M. & Z. HAZBAVI (2017): Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, 87(1), 35–56. DOI: 10.1007/s11069-017-2752-3.

- SAUERBORN, P. (1994): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland – Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. Bonner Bodenkundl. Abh. 13: 189 S.
- SAUPE, G. (1985): Die Erosivität der Niederschläge im Süden der DDR – ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung, 29: 135-169.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl.: 64 S., 8 Abb., 18 Tab.; Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- TALCHABHADEL, R., NAKAGAWA, H., KAWAIKE, K. & R. PRAJAPATI (2020): Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepal. *Modeling Earth Systems and Environment*. DOI: 10.1007/s40808-020-00787-w.
- VOGEL, K., OZTURK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T., WENDI, D., AGARWAL, A., RÖZER, V., KORUP, O. & A. THIEKEN (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse; *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61, (3), 150-162. DOI: 10.5675/HyWa\_2017,3\_1.
- WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. 58pp.
- WURBS, D., KOSCHITZKI, T. & M. MÖLLER (2007): ABAGflux – ein hierarchischer Modellansatz zur Maßnahmenplanung im Boden- und Gewässerschutz. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 110, 721–722.
- WURBS, D. & M. STEININGER (2015): Fortschreibung der Datengrundlagen und Bestimmung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser als Grundlage für die Einteilung der landwirtschaftlich genutzten Flächen nach dem Grad der Wassererosionsgefährdung. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt.
- YUE, T., XIE, Y., YIN, S., YU, B., MIAO, C. & W. WANG (2020): Effect of time resolution of rainfall measurements on the erosivity factor in the USLE in China, *International Soil and Water Conservation Research*, Volume 8, Issue 4, 373–382. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.06.001.

## Aktuelles

### Gewässertyp des Jahres 2022 – Grundwasser

Grundwasser ist nicht nur als Ressource für die Trinkwassergewinnung wichtig, sondern auch für die Industrie, zum Beispiel als Prozesswasser und Rohstoff für die Nahrungsmittelproduktion. Es speist wichtige Ökosysteme wie Feuchtgebiete und den Wald und wird zur landwirtschaftlichen Bewässerung genutzt. Grundwasser wird zunehmend auch als Wirtschaftsgut betrachtet, weil es weltweit der meistgenutzte Rohstoff ist. Im Gegensatz zu anderen Rohstoffen wie Erdöl, Erdgas und Erzvorkommen ist Grundwasser eine Ressource, die sich in vielen Fällen wieder erneuert.

Auf und unter der Erdoberfläche befindet sich das Wasser in einem ständigen Kreislauf zwischen den Meeren, der Atmosphäre und den Kontinenten. Ein großer Teil des Niederschlags, der in Deutschland auf die Erdoberfläche trifft, verdunstet direkt wieder, ohne in ein Oberflächengewässer oder ins Grundwasser zu gelangen. Das übrige Niederschlagswasser – in Deutschland rund 300 mm pro Quadratmeter – fließt besonders bei starkem Regen in Flüssen und Bächen oberirdisch ab. Das feuchte Klima Deutschlands führt in der Regel zu einer Grundwasserneubildung in den Wintermonaten und eher zu einer Abnahme in den Sommermonaten, in denen die Verdunstungsrate höher ist. In der kühlen Jahreszeit versickert ein erheblicher Teil im Boden, fließt unter der Oberfläche weiter und wird zu Grundwasser.

Das Grundwasser füllt die Poren und Risse in Sanden, Kiesen und anderen Gesteinen, ähnlich wie Wasser einen Schwamm ausfüllt. Es bewegt sich langsam, in der Regel mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern pro Tag und verbleibt zum Teil Jahrhunderte und länger in einem Grundwasserleiter. Nicht oder allenfalls eingeschränkt nehmen die tiefen Grundwasserspeicher der Erde am Wasserkreislauf teil. Sie sind überwiegend in den letzten tausend bis zehntausend Jahren entstanden und stellen große unterirdische Süßwasserreserven dar. Zunehmend werden diese fossilen Grundwasserlagerstätten in den wasserarmen Regionen der Welt zur Nutzung herangezogen. Dauerhaft nutzbar ist jedoch nur der Teil des Grundwassers, der am Wasserkreislauf teilnimmt. In größeren Tiefen ist das Grundwasser oft stark salzhaltig und wird als Sole bezeichnet, der Salzgehalt kann bis zu 10-mal höher (> 300 g/l) als in Meerwasser sein.

Langanhaltende Trockenheit mit fehlenden Niederschlägen, reduzierter Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung führt zu einem Absinken der Grundwasseroberfläche. So sind zum Beispiel im Jahr 2018 und 2019 aufgrund der langanhaltenden Trockenheit in einigen Regionen Deutschlands die Grundwasserstände in den oberflächennahen Grundwasserleitern deutlich gefallen. Es herrscht zwar kein Mangel an Trinkwasser und es gibt bisher keine flächendeckenden negativen Auswirkungen auf die Wasserversorgung aus Grundwasserressourcen. Allerdings kam beispielsweise im Sommer 2018 in den besonders betroffenen Regionen die Eigenversorgung mit Trinkwasser teilweise zum Erliegen, weil Hausbrunnen trockenfielen.

Grundwasser wird in vielen Teilen der Erde direkt als Trinkwasser verwendet. In Deutschland werden rund 70 % des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser gewonnen. Auf seinem Weg zu

den Entnahmestellen schützen unterschiedliche Barrieren das Trinkwasser in Deutschland vor Verunreinigungen. Vielfach sorgen bereits die Schutzvorschriften in den ausgewiesenen Trinkwasserschutzgebieten (erste Barriere) dafür, dass kaum Schadstoffe oder Krankheitserreger in das Wasser gelangen. Sofern erforderlich, wirkt die Aufbereitung des Rohwassers im Wasserversorger als zweite Barriere. Die Pflege des Leitungsnetzes durch die Wasserversorger und die fachgerechte Ausführung des häuslichen Verteilsystems stellen weitere Barrieren dar. Dieses Prinzip der vielen Hürden gegen Verschmutzung nennt man das "Multi-barrierenprinzip".

Grundwasser ist nicht nur eine wertvolle Wasserressource für die menschliche Nutzung, sondern steht auch in vielfältiger Weise im Austausch mit Oberflächengewässern, terrestrischen und aquatischen Ökosystemen. Grundwasserabhängige Landökosysteme beschreiben die Lebensräume (Biotope), die im Kontakt mit dem Grundwasser stehen und deren Lebensgemeinschaften, insbesondere die Pflanzen, auf eine ausreichende Menge an Grundwasser angewiesen sind. In Trockenperioden mit steigenden Temperaturen, erhöhter Verdunstung und verlängerten Vegetationsphasen sind deshalb niedrige Grundwasserstände nicht nur problematisch für die Wasserentnahme zur Trinkwassergewinnung, sondern auch für flachwurzelnde Bäume und grundwasserabhängige Biotope. Des Weiteren werden Flüsse und Seen in unseren Breiten durch Grundwasser gespeist. Bei sinkenden Grundwasserständen verringert sich der unterirdische Abfluss in die Oberflächengewässer bis hin zu einer Umkehrung der Fließrichtung.

#### Weitere Informationen:

Themenseite "Grundwasser", Umweltbundesamt  
[www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaessertyp-des-jahres/gewaessertyp-des-jahres-2022-grundwasser](http://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaessertyp-des-jahres/gewaessertyp-des-jahres-2022-grundwasser)

(aus: Newsletter Umweltbundesamt vom 22. März 2022)

### Bundesumweltministerium und Bundesamt für Naturschutz engagieren sich gemeinsam im Meeresnaturschutz für Nord- und Ostsee

Die EU-Mitgliedstaaten haben sich verpflichtet, 30 % der Fläche von Nord- und Ostsee zu schützen, um Meerestiere und -pflanzen zu erhalten. Seit dem Jahr 2008 sind die Meeresnaturschutzgebiete "Doggerbank", "Borkum Riffgrund" und "Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht" in der Nordsee sowie "Fehmarnbelt", "Kadetrinne" und "Pommersche Bucht – Rönnebank" in der Ostsee als Natura-2000-Schutzgebiete europäisch anerkannt. Seit dem Jahr 2017 sind sie auch national gesetzlich geschützt. Mit den neu etablierten Managementplänen für die Ostsee werden nun für alle Meeresnaturschutzgebiete in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) die Maßnahmen konkretisiert. Die drei Ostsee-Schutzgebiete ergänzen mit ihren insgesamt 2.472 km<sup>2</sup> die bisherige Meeresschutzkulisse in der Zuständigkeit des Bundes auf 10.392 km<sup>2</sup>. Das entspricht fast 32 % der AWZ der deutschen Nord- und Ostsee. Schaut man auf die Meeresschutzgebiete des Bundes und der Länder insgesamt, so machen diese nun etwa 45 % der deutschen Meeresfläche aus.

Zu den konkreten Schutzmaßnahmen zählen etwa die Wiederherstellung von Riffen und die Entwicklung von Fischfanggeräten, mit denen der Beifang minimiert wird. Schadstoffeinträge sollen reduziert, der Umgang mit Meeresmüll neu geregelt und umweltschädliche Kampfmittelaltlasten geborgen und entsorgt werden. Überdies wird der Unterwasserlärm deutlich verringert, um vor allem Schweinswale zu schützen. In den Schutzgebieten sollen gezielt die Bestände geschützter Arten und die Vorkommen der Lebensräume, darunter Wale, Seehunde, Robben und Seevögel sowie Sandbänke und Riffe, verbessert werden. Zusätzlich werden das Meeresmonitoring und die Überwachung der Meeresschutzgebiete ausgebaut. Über das 30%-Ziel hinaus wird Deutschland 10 % der geschützten Meeresfläche unter strengen Schutz stellen.

Mit den Managementplänen wird der Bund zukünftig konkrete Schutzmaßnahmen dafür entwickeln. Dafür werden zum Beispiel die Auswirkungen des Schiffsverkehrs in diesen Gebieten untersucht sowie die nötigen Beschränkungen menschlicher Aktivitäten ermittelt. Deutschland hat bereits Vorschläge für Einschränkungen für die Berufsfischerei in Natura-2000-Gebieten in der Nordsee bei der EU-Kommission vorgelegt. Für das Management der Meeresschutzgebiete in der AWZ ist das Bundesamt für Naturschutz verantwortlich. Das Bundesamt hat die Gebietsmanagementpläne für Nord- und Ostsee in engem Austausch mit der Öffentlichkeit, den zuständigen Behörden und Interessenverbänden entwickelt.

In Natura-2000-Schutzgebieten sind menschliche Aktivitäten nicht grundsätzlich verboten. Sie müssen nur so stattfinden, dass sich die geschützten Pflanzen und Tiere im Gebiet positiv entwickeln können. Deshalb sind bestimmte menschliche Aktivitäten wie etwa die Aquakultur in den Naturschutzgebieten bereits durch die entsprechenden Schutzgebietsverordnungen ausgeschlossen. Andere Vorhaben, die potenziell negative Auswirkungen auf die marine Umwelt haben können, werden vor ihrer Genehmigung oder auch Ablehnung einer strengen Prüfung unterzogen. Die Berufsfischerei wird im Rahmen der europäischen "Gemeinsamen Fischereipolitik" geregelt, an der Deutschland mitwirkt. Die in der Ostsee sehr intensive Freizeitfischerei wurde bereits in den nationalen Schutzgebietsverordnungen geregelt.

#### Weitere Informationen:

Managementpläne für Meeresschutzgebiete in der deutschen Nord- und Ostsee  
[www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtlicher-teil](http://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtlicher-teil)

Nationale Meeresschutzgebiete, Bundesamt für Naturschutz  
[www.bfn.de/nationale-meeresschutzgebiete](http://www.bfn.de/nationale-meeresschutzgebiete)

*(aus: Gemeinsame Pressemitteilung Bundesumweltministerium und Bundesamt für Naturschutz vom 9. Februar 2022)*

## Der Klimawandel lässt Gletscherseen in Hochasien wachsen

Wo Gletscher schmelzen, können Gletscherseen entstehen – oftmals mit sehr instabilen Ufern und großem Gefahrenpotenzial. Als Folge eines Dammbrochs oder durch Flutwellen nach Lawinenabgängen oder Felsstürzen können sich enorme

Wassermassen ins Tal ergießen, die noch viele Kilometer stromabwärts große Zerstörungskraft besitzen. Modellrechnungen mit neuesten Daten zeigen nun, dass sich in den Gebirgen Hochasiens als Folge des Klimawandels derart viele neue Gletscherseen bilden könnten, dass sich das in ihnen enthaltene Wasservolumen gegenüber heute verzehnfachen würde. Dies könnte eine Zunahme von Naturkatastrophen durch Gletscherseeausbrüche nach sich ziehen.

Gletscherseeausbrüche (glacial lake outburst floods – kurz: GLOF) zählen zu den gefährlichsten Naturkatastrophen in Hochgebirgen. Besonders in Hochasien sind die plötzlichen Flutwellen, die erhebliche Schutt- und Wassermassen bis zu 100 km weit transportieren können, eine Bedrohung für die Bevölkerung sowie für kritische Infrastruktur. GLOF fordern im weltweiten Vergleich die meisten Todesopfer in Hochasien. In einer nun von Wissenschaftlern der Humboldt-Universität zu Berlin und der Universität Innsbruck veröffentlichten Studie wurden Daten jüngster Klimamodelle und topographische Daten des Felsuntergrundes mit einem eisdynamischen Modell gekoppelt. Die Modellrechnungen zeigen, dass aufgrund des Klimawandels die Anzahl von Gletscherseen in Zentralasien im Verlauf des 21. Jahrhunderts stark zunehmen könnte. Das Wasservolumen der Gletscherseen könnte sich demnach sogar von knapp 4 km<sup>3</sup> im Jahr 2018 auf über 40 km<sup>3</sup> im Jahr 2100 verzehnfachen.

Dass die zunehmende Gletscherschmelze mehr Gletscherseen entstehen lassen wird, ist seit langem bekannt. Das enorme Ausmaß und der genaue Verlauf dieser Zunahme werden jedoch erst jetzt deutlich. Auch wenn die Zusammenhänge zwischen der Zunahme von Gletscherseen und GLOF nicht restlos geklärt sind, würde eine solche Steigerung schwerwiegende Konsequenzen für weite Teile der Hochgebirge in Asien haben.

Interessant bei der modellierten Entwicklung von Gletscherseen ist die Heterogenität des Gebietes. Da in südöstlichen Teilen des Himalayas die Gletscherschmelze bereits weit fortgeschritten ist, fällt die relative Zunahme an Seefläche und -volumen dort vergleichsweise gering aus. Ganz anders in den noch stark vergletscherten nördlichen und nordwestlichen Gebirgszügen, beispielsweise im Tianshan an der Grenze von China mit den zentralasiatischen Ländern Kirgistan und Tadschikistan sowie im pakistanischen Karakorum. Dort wird eine Vervielfachung der Gletscherseen erwartet, die mit einer enormen Zunahme des Wasservolumens einhergehen könnte.

Auch die verschiedenen Klimaszenarien wirken sich unterschiedlich aus. Es spielt eine entscheidende Rolle, ob die Welt einen nachhaltigen Weg einschlägt oder weiterhin ungebremst fossile Brennstoffe nutzt. Gletscher reagieren deutlich auf steigende Temperaturen, und die Seen bilden sich in einer wärmeren Welt vermehrt und schneller aus.

Die Ergebnisse müssen, so die Wissenschaftler, genutzt werden, um auf regionaler und lokaler Ebene zu untersuchen, welche dieser zukünftigen Seen besonders gefährlich werden könnten. Nur so, und das ist ein langfristiges Ziel, wird es möglich sein, in Zusammenarbeit mit den Menschen vor Ort Anpassungsstrategien und Maßnahmen zu entwickeln, die helfen, den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen.

**Fachartikel:**

Furian, W., Maussion, F., Schneider, C. (2022): Projected 21st century glacial lake evolution in High Mountain Asia. *Frontiers in Earth Science*.

DOI: 10.3389/feart.2022.821798

**Weitere Informationen:**

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

*(aus: Pressemitteilung Humboldt-Universität Berlin vom 3. März 2022)*

**Meeresspiegelanstieg und seine Ursachen neu beziffert**

Eine veröffentlichte genaue Aufschlüsselung des globalen Meeresspiegelanstiegs in seine einzelnen Ursachen untermauert die Zuverlässigkeit unseres Wissens über gegenwärtige Meeresspiegeländerungen. Die von der Europäischen Weltraumagentur ESA finanzierte und von der TU Dresden geleitete Studie zeigt, dass die von Satelliten gemessene Entwicklung des Meeresspiegels von Monat zu Monat mit der Summe der einzeln ermittelten Meeresspiegelbeiträge übereinstimmt.

Seit dem Beginn genauer Satellitenbeobachtungen in den 1990er Jahren ist der globale mittlere Meeresspiegel um mehr als 3 cm pro Jahrzehnt gestiegen. Für gut ein Drittel des Anstiegs ist die thermische Ausdehnung des sich erwärmenden Meerwassers verantwortlich. Für die übrigen knapp zwei Drittel sorgen die Wassermassen, die dem Ozean hinzugefügt werden, vor allem durch das Schmelzen von Gletschern und Eisschilden. Dieses Schmelzen hat seit den 1990er Jahren deutlich zugenommen, wodurch sich auch das Tempo des Meeresspiegelanstiegs erhöht hat. Eine Abnahme der an Land gespeicherten Wassermenge, insbesondere durch Grundwasserzehrung aufgrund von Wasserförderung, hat ebenfalls zum Meeresspiegelanstieg beigetragen.

Als eine Probe dafür, wie gut Wissenschaftler die am Meeresspiegelanstieg beteiligten Vorgänge verstehen, vergleichen sie den gemessenen Meeresspiegelanstieg mit der Summe aus den einzeln abgeschätzten Beiträgen der thermischen Ausdehnung des Ozeans und seines Massenzuwachses. Sie stellen also ein "Meeresspiegelbudget" auf. Den Massenzuwachs des Ozeans kann man ermitteln, indem man die Beiträge aus der Massenabnahme des Grönländischen Eisschildes, des Antarktischen Eisschildes und aller übrigen Gletscher weltweit sowie den Beitrag der Änderung kontinentaler Wasserspeicherung einzeln bestimmt. Der Massenzuwachs kann alternativ auch direkt von Satelliten gemessen werden, die kleinste Änderungen der Schwerkraft messen, wie sie durch eine Zu- oder Abnahme von Wasser- und Eismassen in einer bestimmten Region verursacht werden.

Die Europäische Weltraumagentur ESA stellt im Rahmen ihrer Climate Change Initiative (CCI) langfristige, globale Datenreihen von Klimavariablen bereit, die aus Messungen von Erdbeobachtungssatelliten gewonnen werden. Einige dieser Datenreihen stehen mit dem Meeresspiegel in Zusammenhang. Im Projekt "CCI Sea Level Budget Closure" hat nun ein Konsortium aus zehn europäischen Forschungseinrichtungen diese Datenreihen ge-

meinsam mit Blick auf das Meeresspiegelbudget analysiert. Datensätze, die innerhalb von CCI nicht vorlagen, wurden speziell für diesen Zweck erstellt oder von anderen Quellen hinzugezogen.

Dichteänderungen des Ozeanwassers, und damit dessen thermische Ausdehnung, wurden mithilfe einer neuartigen Kombination von Temperatur- und Salzgehaltmessungen des Argo-Treibbojen-Netzwerks mit aus Satellitendaten abgeleiteten Meeresoberflächentemperaturen bestimmt. Um Änderungen des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes zu bestimmen, wurden sowohl Satellitenmessungen von Höhenänderungen der Oberfläche als auch Satellitenmessungen von Änderungen der Erdanziehungskraft herangezogen. Änderungen der Gletscher weltweit wurden durch ein globales Gletschermodell, gestützt durch Fernerkundungsdaten, ermittelt. Kontinentale Wasserspeicherungsänderungen wurden durch ein globales Hydrologie-Modell berechnet, dafür wurde dessen Erfassung der Grundwasserentnahme weiterentwickelt.

In den Jahren von 1993 bis 2016 stieg der globale Meeresspiegel laut Satellitenmessungen im Mittel um 3,0 Millimeter pro Jahr (mm/Jahr). Der Beitrag thermischer Ausdehnung wird mit 1,1 mm/Jahr abgeschätzt. Das sind 38 % des gemessenen Meeresspiegelanstiegs. Der Massenbeitrag wurde mit 1,7 mm/Jahr ermittelt (57 % des gemessenen Anstiegs). Er enthält 0,6 mm/Jahr (21 %) von den Gletschern außerhalb von Grönland und der Antarktis, 0,6 mm/Jahr (20 %) von Grönland, 0,2 mm/Jahr (6 %) von der Antarktis und 0,3 mm/Jahr (10 %) von der Abnahme der kontinentalen Wasserspeicherung. Im jüngeren Teilzeitraum von 2003 bis 2016 war der Meeresspiegelanstieg stärker (3,6 mm/Jahr), weil der Massenbeitrag zugenommen hat. Dieser betrug nun etwa 2,4 mm/Jahr und damit 66 % des gesamten Meeresspiegelanstiegs, während der thermische Ausdehnungseffekt mit etwa gleichbleibenden 1,2 mm/Jahr nur noch 33 % ausmachte. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit anderen Studien der letzten Zeit. Durch die hier erfolgte Weiterentwicklung von Methoden und Datensätzen gewinnen sie noch einmal an Zuverlässigkeit. Dafür sorgt nicht zuletzt, dass die erreichbaren Genauigkeiten für alle Teilgrößen nach einem einheitlichen Schema beziffert werden. Die sich daraus ergebende Restunsicherheit beläuft sich auf etwa 10 % des Meeresspiegelanstiegs. Tatsächlich passen der gemessene Meeresspiegelanstieg und die Summe der Beiträge bis auf diese Restunsicherheit zusammen.

Aus der Studie ergibt sich weiterer Forschungsbedarf zum Verständnis der Satellitenmessungen und der betrachteten physikalischen Prozesse. Beispielsweise beeinflussen Bewegungen der festen Erde unter dem Ozean einige Satellitenmessungen. Diese Effekte müssen von Änderungen im eigentlichen Ozean unterschieden werden und tragen zur Restunsicherheit im Meeresspiegelbudget bei.

**Fachartikel:**

Horwath, M., Gutknecht, B.D., Cazenave, A., Palanisamy, H., Marti, F., Marzeion, B., Paul, F., Le Bris, R., Hogg, A.E., Otsuka, I., Shepherd, A., Döll, P., Cáceres, D., Müller Schmied, H., Johannessen, J.A., Nilsson, J.E.Ø., Raj, R.P., Forsberg, R., Sandberg Sørensen, L., Barletta, V.R., Simonsen, S.B., Knudsen, P., Andersen, O.B., Rannald, H., Rose, S.K., Merchant, C.J., Macintosh, C.R., von Schuckmann, K., Novotny, K., Groh, A., Restano, M., Benveniste, J. (2022): Global sea-level budget and ocean-mass budget, with a focus on advanced data

products and uncertainty characterisation, Earth System Science Data, 14, 411–447.

DOI: 10.5194/essd-14-411-2022

#### Weitere Informationen:

Projekt "ESA CCI Sea Level Budget Closure"

[www.climate.esa.int/en/projects/sea-level-budget-closure](http://www.climate.esa.int/en/projects/sea-level-budget-closure)

Professur für Geodätische Erdsystemforschung, TU Dresden  
tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipg/gef

*(aus: Online-Mitteilung Professur für Geodätische Erdsystemforschung, TU Dresden vom 7. Februar 2022)*

### Nährstoffkreislaufprozesse bei einem Taifun

Im September 2018 geriet eine Expedition im Rahmen des deutsch-chinesischen Projekts MEGAPOL unter den Einfluss des Supertaifuns "Mangkhut". Dabei gelang es, einzigartige Datensätze zum Nährstoffbudget in dem betroffenen Teil des Südchinesischen Meeres zu erheben. Es wurde deutlich, dass nicht nur an Land, sondern auch auf dem Meer von dem Supertaifun gravierende Veränderungen ausgelöst wurden: Aus tieferen Wasserschichten wurden enorme Nährstoffmengen in das Oberflächenwasser eingemischt, wo sie das Wachstum des Phytoplanktons in wenigen Wochen verdreifachten. Besonders ausgeprägt konnte der Taifun seine Wirkung im Übergang von der Tiefsee zum flachen Küstenozean entfalten.

Die Zerstörungskraft von Taifunen ist an Land unübersehbar. Ihre Zugbahnen zeichnen sich als Schneisen der Verwüstung in der Landschaft ab. Aber was geschieht unter Wasser bei solchen Extremereignissen? Im September 2018 passierte ein sogenannter Super-Taifun mit Windgeschwindigkeiten von annähernd 200 km/h das Südchinesische Meer und sorgte in der Umgebung von Hongkong für gewaltige Schäden. Ein Team von Wissenschaftlern des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) befand sich zu dieser Zeit an Bord des chinesischen Forschungsschiffes HAI YANG DI ZHI SHI HAO. Sie waren im Rahmen des deutsch-chinesischen Forschungsprojektes MEGAPOL unterwegs, in dem die Auswirkungen von Megacitys auf die ihnen vorgelagerten Seegebiete untersucht werden. Das dafür geplante Stationsprogramm, auf dem neben Strömungs-, Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoffmessungen auch Proben zur Bestimmung des Nährstoffgehaltes genommen wurden, erstreckte sich vom Schelfbereich über die Schelfkante bis in die Tiefseebereiche des Südchinesischen Meeres. Teile des Stationsplans lagen unmittelbar in der Zugbahn des Super-Taifuns, der unter dem Namen "Mangkhut" in die Annalen einging. Als Mangkhut das Gebiet erreichte, hatten die Warnemünder Wissenschaftler bereits mit ihrer Arbeit begonnen. Dieser Umstand ermöglichte einen einzigartigen Vorher-nachher-Vergleich.

Die größten Veränderungen fanden in den oberen 100 m des Wasserkörpers statt. Die vor dem Taifun gemessenen Werte änderten sich alle drastisch. Um die Nährstoffsituation umfassend zu verstehen, wurden sowohl die anorganischen Nährstoffe Nitrat bzw. Nitrit, Phosphat und Silikat, partikulärer organischer Kohlenstoff und Stickstoff, gelöster organischer Kohlenstoff, sowie der Gesamtgehalt an gelöstem Stickstoff, Sauerstoff,

Chlorophyll und Schwebstoffe analysiert. Die Analysen fanden im Warnemünder Labor statt.

Generell waren die Auswirkungen auf dem Schelf und an der Schelfkante deutlich größer als in den Tiefseebereichen. Im Allgemeinen wurden einerseits durch den extremen Frischwasserabfluss vom Land, andererseits durch Auftriebsereignisse Nährstoffe in enormen Mengen in das Oberflächenwasser eingemischt, was dort nicht nur unmittelbar das Algenwachstum ankurbelte, sondern diese Algenblüten auch für einige Wochen aufrecht erhielt.

Die Auswirkungen von Taifunen im Meer lassen sich meist gut über Satelliten erfassen, die allerdings nur die obersten Meter des Oberflächenwassers abbilden. Durch die Anwesenheit des Warnemünder Teams in dem vom Taifun betroffenen Gebiet konnten einzigartige Daten auch aus tieferen Wasserschichten gewonnen werden, die eine viel bessere Bilanzierung erlauben. So ließ sich anhand der Daten auch eine Kohlenstoff-Bilanz der durch die Vermischungsprozesse ausgelösten enormen Algenblüten errechnen.

Der Taifun Mangkhut hat im Vergleich zur normalen Situation fast zu einer Verdreifachung der Primärproduktion geführt. Die eventuelle Hoffnung, dadurch so viel CO<sub>2</sub> zu binden, dass sich ein positiver Begleiteffekt auf das Klima ergeben könnte, muss jedoch enttäuscht werden: Die Forscher gehen davon aus, dass sich die durch den Taifun Mangkhut ausgelöste CO<sub>2</sub>-Bindung und -Emission die Waage hielten.

Arbeiten des deutschen Forscherteams fanden im Rahmen des vom BMBF finanzierten Projektes "MEGAPOL-Megacity's fingerprint in Chinese southern marginal seas" (Fördernummer: 03F0786A) statt.

#### Fachartikel:

Kuss, J., Frazão, H.C., Schulz-Bull, D.E., Zhong, Y., Gao, Y., Wanick, J.J. (2021): The impact of typhoon "Mangkhut" on surface water nutrient and chlorophyll inventories of the South China Sea in September 2018. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 126, e2021JG006546.

DOI: 10.1029/2021JG006546

#### Weitere Informationen:

Sektion Meereschemie, IOW

[www.io-warnemuende.de/meereschemie.html](http://www.io-warnemuende.de/meereschemie.html)

*(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde vom 3. Februar 2022)*

### Projekt EPICA hat erste Bohrkerne aus dem Eis der Antarktis gehoben

Wie war das Klima vor tausenden oder gar Millionen Jahren? Antworten könnte das tiefe Eis in der Antarktis liefern: Es enthält Informationen über die Temperaturentwicklung und die Zusammensetzung der Atmosphäre der Vergangenheit. Mit einem Bohrkern, der Klimadaten der letzten 1,5 Mio. Jahre enthält, will ein internationales Forschungsteam diese Informationen im Projekt "Beyond EPICA-Oldest Ice" entschlüsseln. Ende Januar hat es die erste Kampagne erfolgreich abgeschlossen

und die ersten Bohrkern ge hoben. Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Instituts waren maßgeblich bei der Planung und auch vor Ort beteiligt.

Von Ende November 2021 bis Ende Januar 2022 richteten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Lager für die Bohr- stelle am Little Dome C in der Antarktis ein und installierten ein komplexes Bohrsystem, das für die Fortsetzung in den nächsten Jahren erforderlich ist. Little Dome C ist ein zehn Quadratkilo- meter großes Gebiet und einer der extremsten Orte der Erde. Die Bohrungen fanden in einer Höhe von 3.233 Metern über dem Meeresspiegel statt, bei durchschnittlichen antarktischen Sommertemperaturen von fast immer unter -40 °C.

Das Lager beherbergt nun die Kontrollkabine, das Bohrsystem, das bis zu viereinhalb Meter lange Eiskerne entnehmen kann, und ein Labor, um Proben aufzubereiten und zu lagern. In den kommenden drei antarktischen Sommern, jeweils von Mitte November bis Anfang Februar, wird das Team von Beyond EPICA Bohrungen durchführen, bis es in einer Tiefe von etwa 2.500 m auf Eis trifft, das bis zu 1,5 Mio. Jahre alt ist. Das Eis enthält Luft- bläschen, aus denen die Forscherinnen und Forscher den Gehalt von Treibhausgasen wie Methan und Kohlendioxid in der Atmo- sphäre sowie die Entwicklung der Temperaturen der Vergangen- heit bestimmen können. Im Jahr 2025 sollen die ersten Daten der Bohrkern-Analysen vorliegen.

Bei der ersten Bohrkampagne erreichte das Forschungsteam eine Tiefe von 130 m, wo das Eis Informationen über das Klima und die Atmosphäre der letzten 3.000 Jahre bewahrt. Die Bohr- kerne werden derzeit in der italienisch-französischen Concordia- Station auf dem ostantarktischen Plateau gelagert. Koordiniert wird das Vorhaben EPICA vom Institut für Polarwissenschaften des Nationalen Forschungsrats Italiens (Cnr-Isp). Die Forscher- gruppe ist mit den bisherigen Arbeiten sehr zufrieden. In der nächsten Kampagne wird das Bohrsystem abgeschlossen sowie getestet, um dann mit den Tiefbohrungen fortzufahren.

In einer ersten Projektphase hatte das Konsortium unter Leitung des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) drei Jahre lang nach einem Ort gesucht, an dem das Eis auch in großer Tiefe so sauber geschichtet ist, dass es wertvolle Ergebnisse liefern kann. Die Wissenschaftler richteten die Bohr- stelle ein und bestückten die obersten 120 m mit Fieberglasrohren. Diese Ummantelung nutzen sie als Ausgangs- punkt für die eigentliche Tiefbohrung. Die Forscher konnten zusammen mit allen Partnern trotz der erheblichen Einschrän- kungen durch die Covid-19-Pandemie die hoch gesteckten Ziele erreichen. Insgesamt koordiniert das AWI-Team mehrere Arbeits- pakete rund um den Eisbohrkern, etwa zu den physikalischen Eigenschaften, stabilen Wasserisotopen, der Geophysik oder zum Klima- und Kohlenstoffkreislauf.

Die AWI-Forscher glauben, dass dieser Eiskern bedeutende Informationen über das Klima der Vergangenheit und über die Treibhausgase in der Atmosphäre während des mittelpleistozänen Übergangs (Mid-Pleistocene Transition, MPT) vor 900.000 bis 1,2 Mio. Jahren liefern wird. Während dieses Übergangs änderte sich die Periodizität des Klimas zwischen den Eiszeiten von 41.000 auf 100.000 Jahre: Der Grund, warum dies geschah, ist das Rätsel, das sie zu lösen hoffen.

In Beyond EPICA-Oldest Ice arbeiten zwölf Forschungseinrich- tungen aus Deutschland, Italien, Frankreich, Großbritannien, Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz, Dänemark und Belgien zusammen. Die Europäische Kommission fördert das Projekt mit 11 Mio. €.

#### Weitere Informationen:

Abteilung Glaziologie, Alfred-Wegener-Institut  
[www.awi.de/forschung/geowissenschaften/glaziologie](http://www.awi.de/forschung/geowissenschaften/glaziologie)

(aus: Pressemitteilung Alfred-Wegener-Institut vom 1. Februar 2022)

### Satellitenmissionen zur Untersuchung des Abschmelzens von westantarktischen Gletschern

Bisher standen die benachbarten Eisgiganten Thwaites und Pine Island im Fokus der Polarforschung, da sie sehr fragil sind und den globalen Meeresspiegel um bis zu 1,2 m ansteigen lassen könnten. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat die Veränderungen in der Westantarktis gemeinsam mit internationalen Forschungspartnern aufgedeckt und analysiert. Den Ursachen für die rapiden Abschmelzungen der kleineren Gletscher kamen sie mithilfe spezieller Radardaten der Satelliten- missionen TanDEM-X und COSMO-SkyMed auf die Spur.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind wichtig, um Gletscher- prozesse besser zu verstehen und so die Entwicklung der gesamten Antarktis vorherzusagen. Klimaforschende können dann künftig noch genauer berechnen, wie stark der Meeres- spiegel ansteigen wird und welche Schutzmaßnahmen am wirkungsvollsten sind. Die Studie ist das Ergebnis einer Zusam- menarbeit von der University of Houston, dem DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, der University of California, der Université Grenoble Alpes sowie der italienischen Raumfahrtagentur ASI.

Die Gletscher Pope, Smith und Kohler sind in den letzten 30 Jah- ren deutlich geschrumpft: Sie sind dünner geworden, haben Schelfeis an den Ozean verloren und sich weiter ins Land zu- rückgezogen. Auffällig war hier der Rückgang der Aufsetzlinie, also die Grenze, an der das Eis den Kontakt zum Festland verliert und beginnt, auf dem Meer zu schwimmen. Daher richteten die Radar-Expertinnen und -Experten ein Augenmerk auf diesen Übergangsbereich. So konnten sie auch erstmals drastische Ver- änderungen des Pope-Gletschers nachweisen, der sich im Jahr 2017 innerhalb von nur drei Monaten mit einer Geschwindigkeit von 11,7 km/Jahr zurückzog.

Erdbeobachtungssatelliten sind für die Gletscher- und Klima- forschung unverzichtbar geworden. Früher musste jahrelang gewartet werden, bis verwertbare Daten zu den Polregionen aufbereitet waren. Dank der hochleistungsfähigen Satelliten- missionen TanDEM-X und COSMO-SkyMed können nunmehr die Polregionen heute im Monatsrhythmus analysiert werden. Aus den Aufnahmen und mit neuen Methoden zur Datenauswer- tung gewinnen die Forscher eine völlig neue Ebene an Details, um Gletscher- und Klimamodelle weiter zu verbessern. Durch die gezielte Analyse von TanDEM-X-Zeitreihen konnten sie die Ver- änderungen sogar im Zwei-Wochen-Takt statt alle vier Wochen nachvollziehen.

Die neue Studie liefert damit ein weiteres wichtiges Puzzleteil für die Gletscher- und Klimaforschung. Die physikalischen Schmelzprozesse von Pope, Smith und Kohler laufen bei den anderen Gletschern rund um die Amundsen-See identisch ab. Die Riesen Thwaites und Pine Island könnten mit ihren hohen Masseverlusten die restliche Westantarktis destabilisieren, mit verheerenden Folgen für das Leben auf der Erde. Wenn Klimamodelle künftig berücksichtigen, wie stark eine schwimmende Eisplatte von unten schmilzt, könnten sie auch den Rückgang von Gletschern noch genauer bestimmen.

Die Unterseite eines Gletschers entzieht sich den Blicken von oben, sodass der Eisverlust nicht direkt messbar ist. Mithilfe von digitalen TanDEM-X-Höhenmodellen konnten die Wissenschaftler diese verborgene Schmelzrate nun genau bestimmen. Während zum Beispiel der Smith-Gletscher über Land im Zeitraum der Jahre 2011 bis 2019 etwa 5 m/Jahr abschmolz, betrug die Schmelzrate an der freischwimmenden Gletscherunterseite ungefähr 22 m/Jahr. An bestimmten Stellen wies der Gletscher Smith sogar Schmelzraten von mehr als 100 m/Jahr auf, mit einem Spitzenwert von 140 m/Jahr in 2016.

Einige Untersuchungen mit Klimamodellen bestätigten, dass die Computerberechnungen der Aufsetzlinie nur dann mit den tatsächlichen Messungen übereinstimmen, wenn sie die neuen Werte der Schmelzrate miteinkalkulieren. Darüber hinaus haben die neuen Radardaten und Erkenntnisse den Forschungsverbund "International Thwaites Glacier Collaboration" maßgeblich dabei unterstützt, Messkampagnen vorzubereiten und geeignete Stellen für Testbohrungen auszuwählen.

Für die Bestimmung der Abschmelzraten hat das Forscherteam am DLR zusätzlich mehr als 240 digitale TanDEM-X-Höhenmodelle erzeugt, die die Westantarktis von den Jahren 2011 bis 2019 hochgenau abbilden. Dazu gehört eine eingespielte Produktion: Das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum ist für den Betrieb von TerraSAR-X und TanDEM-X verantwortlich und kommandiert die Zwillingssatelliten für die benötigten Aufnahmen. Aufgezeichnet werden die Radardaten vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum an seinen Empfangsstationen in Neustrelitz, Inuvik (kanadische Arktis) und GARS O'Higgins (Antarktis). Das DLR-Institut für Methodik der Fernerkundung liefert die Eingangsdaten für die automatisierte TanDEM-X-Prozessierungskette. Die interferometrische Prozessierung, Geokodierung und Kalibrierung der TanDEM-X-Aufnahmen wurde am DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme implementiert und durchgeführt.

Die Spitzenposition Deutschlands im Bereich Radarforschung und Radartechnologie ermöglicht die Entwicklung einer neuen Generation von Radarsatelliten, die die dringend benötigten Datengrundlagen für Forschung und Weltgemeinschaft erweitern. Dadurch können Wissenslücken geschlossen und Lösungen für globale gesellschaftliche Herausforderungen erarbeitet werden. Die technischen wie auch wissenschaftlichen Kompetenzen können für künftige Satellitenmissionen, vor allem im L-Band (Radar-Frequenzbereich "L"), weiter ausgebaut werden.

Radarsatelliten mit einem langwelligen Frequenzbereich haben den Vorteil, dass sie auch durch Vegetation hindurch bis zum Boden blicken können. In den Polregionen könnte eine Radar-

mission im L-Band Gletscherstrukturen und dynamische Prozesse wie das Abschmelzen noch genauer abbilden. Deutschland könnte hier weiter neue Maßstäbe in der Erdbeobachtung setzen, den globalen Wandel mit einer neuen Qualität beobachten und wichtige Handlungsempfehlungen ermöglichen.

#### Fachartikel:

Milillo, P., Rignot, E., Rizzoli, P., Scheuchl, B., Mouginot, J., Bueso-Bello, J.L., Prats-Iraola, P., Dini, L. (2022): Rapid glacier retreat rates observed in West Antarctica. *Nature Geoscience* 15, 48-53. DOI: 10.1038/s41561-021-00877-z

#### Weitere Informationen:

Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, DLR  
www.dlr.de/hr

(aus: Pressemitteilung Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt vom 28. Januar 2022)

### Talsperren und Staubereiche als Senke für Mikroplastik identifiziert

Mikroplastik lässt sich mittlerweile nicht nur in Meeren, sondern auch in vielen Binnengewässern finden. Das gilt auch für Talsperren und Staubereiche, auf deren Gewässergrund sich winzige Plastikteilchen ablagern können. Das zeigen die Ergebnisse zum Abschluss des vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) koordinierten Verbundprojekts MikroPlaTaS, das über dreieinhalb Jahre vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Wie sich diese Ablagerungen jedoch langfristig auf die Ökosysteme auswirken, ist nicht abschließend geklärt.

Das Forschungsteam des Verbundprojekts MikroPlaTaS (Mikroplastik in Talsperren und Staubereichen) hat während der Projektlaufzeit drei Brauchwasser-Talsperren in Sachsen (Bautzen, Quitzdorf und Malter) und drei gestaute Flussbereiche in Nordrhein-Westfalen (Abschnitte der Ems, der Lippe sowie die ehemaligen Rieselfelder der Stadt Münster) untersucht, um das dortige Vorkommen und Verhalten von Mikroplastik näher zu bestimmen. Dabei zeigte sich, dass strömungsberuhigte Gewässersysteme wie Talsperren und Stauhaltungen als Senken für Mikroplastik fungieren. Das heißt: Die meisten eingetragenen Plastikpartikel verbinden sich im Laufe der Zeit mit natürlichen Stoffen, sinken zu Boden und werden durch verschiedene biogeochemische Prozesse dauerhaft in den Sedimenten gebunden. Dass die gefundenen Plastikpartikel vorrangig aus Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) bestehen, war für das Wissenschaftlerteam angesichts der massenhaften Verwendung dieser beiden Substanzen, etwa für die Herstellung von Einweg- und Verpackungsmaterial, wenig überraschend.

Wie sich dies langfristig auf die Ökosysteme auswirkt, ist jedoch noch offen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse diskutieren die Forscher nun gemeinsam mit ihren Praxispartnern, was der Mikroplastikeintrag für Talsperren bedeutet und welche Vorkehrungen künftig getroffen werden sollten, um eine Remobilisierung und damit auch einen Eintrag in andere Gewässer und letztlich ins Meer zu begrenzen. Daraufhin möchten sie Handlungsempfehlungen erarbeiten und diese der Politik sowie weiteren Akteuren zur Verfügung stellen.

Die Forscher untersuchten auch das Entstehen und die Rolle von Mikroorganismen-Gemeinschaften (sogenannten Biofilmen), die sich auf den Plastikpartikeln bilden können. So hängt ihre Qualität als Nahrungsgrundlage für Wasserlebewesen wie Schnecken vom Plastiktyp ab, auf dem sie wachsen. Bei Laborversuchen mit Fadenwürmern und Rädertierchen zeigte sich, dass die Gesamfläche der schwebenden Plastikpartikel bestimmt, ob sie toxisch auf die exponierten Organismen wirken – unabhängig davon, ob die Partikel von den Organismen aufgenommen werden. Vor allem sinkt die Verfügbarkeit der Nahrung, wenn sich in der direkten Umgebung Mikroplastikpartikel befinden. Werden mit der Nahrung solche Teilchen gefressen oder muss die Nahrung zwischen den unverdaulichen Partikeln gesucht werden, können die Tiere weniger Nahrung aufnehmen. Zudem hat die gestörte Nahrungsaufnahme auch Auswirkungen auf die Reproduktionsleistung der Organismen, da sie sich weniger gut vermehren können. Wie stark derartige Effekte von Mikroplastik in der freien Natur auftreten, ist noch unbekannt. Man weiß bisher zu wenig über die genaue Verteilung von kleinem Mikroplastik und seine Verbindung mit natürlichen Stoffen in den Ökosystemen. Das liegt nicht zuletzt daran, dass die verfügbaren Nachweismethoden zu komplex und aufwendig sind.

Der Forschungsschwerpunkt "Plastik in der Umwelt – Quellen, Senken, Lösungsansätze" ist Teil der Leitinitiative Green Economy des BMBF-Rahmenprogramms "Forschung für nachhaltige Entwicklung" (FONA3). MikroPlaTaS ist eines von 20 Verbundprojekten des Förderschwerpunktes "Plastik in der Umwelt", in dem sich acht Projekte unter dem Themenbereich "Eintragspfade, Transport, Zersetzung und Verbleib in limnischen Systemen" mit Binnengewässern beschäftigen. Das Vorhaben lief vom 1. Januar 2018 bis 30. September 2021 und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit rd. 1,5 Mio. € gefördert. Zu den wissenschaftlichen Partnern gehören neben der Universität Münster die Universitäten Potsdam und Bielefeld sowie zwei im Bereich des Gewässerschutzes beteiligte Firmen.

#### Weitere Informationen:

UFZ-Department Seenforschung  
www.ufz.de/index.php?de=34221

*(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 2. März 2022)*

### Wasser-Extremereignisse: BMBF-Projekt "FloReST" zur Untersuchung von Notabflusswegen gestartet

Starkregen und daraus entstehende Sturzfluten haben in den letzten Jahren vermehrt zu weitreichenden Schäden an technischen und sozialen Infrastrukturen geführt. Notabflusswege können dazu beitragen, die Wassermengen möglichst schadlos durch Wohngebiete abzuleiten. Damit befasst sich das auf eine Laufzeit von drei Jahren angelegte Verbundforschungsprojekt "Urban Flood Resilience – Smart Tools" (FloReST), das nun unter der Förderinitiative "Wasser-Extremereignisse" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gestartet ist.

Das Projektkonsortium des Vorhabens besteht aus der Hochschule Koblenz, der Universität Trier, der Hochschule Trier mit dem Umwelt-Campus Birkenfeld, dem Deutschen Forschungs-

zentrum für Künstliche Intelligenz sowie beteiligten Ingenieurgesellschaften.

Die Sturzfluten der jüngsten Vergangenheit haben kleinere Gewässer beziehungsweise hohe Oberflächenabflüsse fernab der eigentlichen Gewässer verursacht. Bei diesen Sturzfluten müssen die Wassermengen möglichst unschädlich durch die urbane Bebauung abgeleitet werden. Technische Rückhaltemaßnahmen sind damit oft überlastet, sodass lokale Objektschutzmaßnahmen im Risikobereich nicht ausreichen. Es empfiehlt sich, diese mit Notabflusswegen als wesentliches Element der wassersensiblen Stadtentwicklung zu ergänzen. Die Fachöffentlichkeit ist sich seit Jahren einig, dass dies erforderlich ist. Es mangelt jedoch an einer Umsetzung in der Praxis.

Das Team des Verbundforschungsprojektes FloReST entwickelt verschiedene innovative, technologiebasierte Lösungen, die unterschiedliche Ansätze zur belastungsunabhängigen und -abhängigen Ausweisung von Notabflusswegen verfolgen. In enger Abstimmung mit Pilotkommunen, Fachverbänden und betroffenen Bürgerinnen und Bürgern wird damit ein intelligenter, dialogorientierter Weg zur nachhaltigen und lokal angepassten Umsetzung von Maßnahmen zur Hochwasser- und Sturzflutvorsorge in urbanen Räumen eröffnet.

Mit dem interdisziplinären Projekt sollen funktionale und auf kommunale wie wirtschaftliche Anwender angepasste "Smart Tools" zur Steigerung der Resilienz kritischer Infrastrukturen gegenüber Wasser-Extremereignissen entwickelt werden. Dabei stellt die kontinuierliche Einbindung von fünf bereits von Sturzfluten betroffenen Kommunen sicher, dass sich die entwickelten Smart Tools in die Praxis übertragen lassen. Informationen über Gefahren und Risiken, resultierend aus regelmäßig auftretenden Wasser-Extremereignissen, werden digital bereitgestellt und zugänglich gemacht. Die nachhaltige Sensibilisierung für die Folgen solcher Sturzfluten sowie das Aufzeigen möglicher Lösungsansätze und eigener Handlungspotenziale, um Wasser-Extremereignissen besser zu begegnen, spielt dabei eine bedeutende Rolle.

Während der dreijährigen Projektlaufzeit verfolgen die sechs Verbundpartner eine Reihe von Schwerpunktthemen, wie etwa die Neuentwicklung eines robotergestützten Systems mit integrierter Positionierungs- und Mess-Sensorik zur hochaufgelösten 3D-Datenerfassung der innerörtlichen Infrastruktur. Damit wird eine bisher schwer erreichbare Erfassung kleinskaliger Fließhindernisse und Bruchkanten ermöglicht. Technologien mit Künstlicher Intelligenz sollen ermöglichen, Notabflusswege durch Machine-Learning-Verfahren zukünftig auch ohne die ressourcen-intensive, detaillierte Anpassung hydraulischer Modelle für große Einzugsgebiete nachzuweisen. Zudem kann der Einsatz von UAV-Drohrentechnik (Unmanned Aerial Vehicle) und Dotierversuchen dazu dienen, belastungsabhängige Notabflusswege experimentell auszuweisen, um die Maßnahmen zur Hochwasser- und Sturzflutvorsorge zielgenau planen und umsetzen zu können.

Außerdem ist geplant, die Infrastruktur zur digitalen Daten- und Methodenbereitstellung in Form eines Geo-Data-Warehouse sowie einer mobilen App zu entwickeln. Über die mobile App wird die Erfassung von Erfahrungen und Ortskenntnissen der Bürgerinnen und Bürger zu vergangenen Starkregenereignissen

ermöglicht und gleichzeitig die Bürgerbeteiligung gefördert. Die vernetzte Risikokommunikation mit Pilotkommunen gewährleistet eine hohe Interaktivität und die grundlegende Einbeziehung der Betroffenenperspektive. Die Risikokommunikation zielt dabei insbesondere auf die Einbeziehung und Aktivierung von Gruppen in Gebieten mit hoher sozialer Ungleichheit.

Neben der Zusammenarbeit mit fünf Pilot-Kommunen wird das Projekt FloReST durch Mitglieder eines Projektbeirats aus der Praxis (Ingenieurkammer Rheinland-Pfalz), aus der Landesverwaltung (Kompetenzzentrum Hochwasservorsorge und Hochwasserrisikomanagement, Landesamt für Umwelt in Rheinland-Pfalz) sowie dem Gemeinde- und Städtebund (Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz) unterstützt.

#### Weitere Informationen:

Fachbereich Bauwesen, Hochschule Koblenz  
[www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen/die-fachrichtung](http://www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen/die-fachrichtung)

(aus: Pressemitteilung Hochschule Koblenz vom 17. März 2022)

### Infolge des Klimawandels drohen in Deutschland sinkende Grundwasserspiegel

Der Klimawandel hat unmittelbare Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen. Auch in Deutschland drohen in den nächsten Jahrzehnten abnehmende Grundwasserspiegel. Dies ist das Ergebnis einer Studie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Die Fachleute von BGR und KIT hatten mithilfe Künstlicher Intelligenz in verschiedenen Prognosemodellen untersucht, wie sich der Klimawandel im 21. Jahrhundert auf die Grundwasserressourcen in Deutschland auswirken wird. Dafür nutzten sie Verfahren des Maschinellen Lernens (Deep Learning), um auf Grundlage vorhandener Grundwasserdaten aus ganz Deutschland für verschiedene Standorte die Entwicklung des Grundwasserspiegels anhand unterschiedlicher Klimaszenarien, die aus dem fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change, dem Weltklimarat (IPCC) stammen, zu bewerten. Diese reichten von einer angenommenen Erwärmung der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 von unter 2 °C, wie sie das Pariser Klimaabkommen als Zielmarke definiert, über ein mittleres Prognosemodell – plus 2,6 °C – bis zum sogenannten Business-as-usual-Szenario, das ohne entsprechende Klimaschutzmaßnahmen von einer Erwärmung um bis zu 5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zustand ausgeht. In die wissenschaftliche Untersuchung flossen ausschließlich direkte klimatische Einflüsse und Veränderungen ein, während anthropogene Faktoren wie zum Beispiel Grundwasserentnahmen nicht miteinbezogen wurden.

Alle drei untersuchten Klimaszenarien führen laut der Experten zu mehr oder weniger starken Entwicklungen mit Dürreeffekten, sinkenden Grundwasserspiegeln und einer veränderten Wasserverfügbarkeit. Während die beiden optimistischeren Szenarien geringer ausgeprägte und zahlenmäßig weniger deutliche Tendenzen aufweisen, stellten die Fachleute von KIT und BGR im Fall des stärksten der drei Erwärmungsszenarien für die meisten

Standorte einen Trend zu signifikant abnehmenden Grundwasserspiegeln fest. Vor allem für die nahe Zukunft sind die Ergebnisse dieser Prognose sehr relevant, da dieses Szenario der heutigen Situation am nächsten kommt.

Besonders sichtbar sind die zukünftigen negativen Auswirkungen in Nord- und Ostdeutschland, wo es bereits heute entsprechende Entwicklungen gibt. Hier drohen vor allem gegen Ende des Jahrhunderts längere Perioden mit niedrigen Grundwasserständen. Diese Situation kommt in den beiden schwächeren Erwärmungsszenarien nicht in diesem Ausmaß vor. Für die Fachleute von KIT und BGR ist dies ein Indikator dafür, dass eine Minderung der Treibhausgasemissionen einen positiven Effekt auf die künftigen Grundwasserstände haben kann.

#### Fachartikel:

Wunsch, A., Liesch, T., Broda, S. (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. *Nature Communications* 13, article number 1221, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-28770-2

#### Weitere Informationen:

Portal "Klima und Umwelt", KIT-Zentrum  
[www.klima-umwelt.kit.edu](http://www.klima-umwelt.kit.edu)

(aus: Presseinformation Karlsruher Institut für Technologie vom 9. März 2022)

### Warum auch Kleingewässer schützenswert sind

Kleine Gewässer, also Teiche, Sölle und Tümpel, machen weltweit 30 bis 50 % der stehenden Gewässer aus. Wegen ihrer geringen Größe wurde ihre Bedeutung lange unterschätzt und sie werden in gesetzlichen Bestimmungen deshalb kaum berücksichtigt. Inzwischen weiß man: Wegen ihrer Häufigkeit, Heterogenität, außergewöhnlichen Biodiversität und biogeochemischen Potenz spielen sie eine wichtige Rolle in Einzugsgebieten, Landschaften und möglicherweise sogar auf kontinentaler Ebene. Anlässlich des Weltwassertags am 22. März 2022 blickten Expertinnen und Experten des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) auf diese eher unscheinbaren Gewässer.

Kleingewässer wie Sölle, Tümpel, Pfuhe und Weiher werden in der seenreichen Landschaft in Nordostdeutschland oft übersehen oder als wenig wertvoll empfunden. Zu Unrecht, denn sie sind von zentraler Wichtigkeit für die aquatische Biodiversität, etwa als Trittsteinbiotope für nahezu 70 % der regionalen Süßwasserarten in Europa. Sie schaffen inselartige Verbindungen zwischen entfernten Habitaten und ermöglichen so die Rück- oder Neubesiedlung von Lebensräumen. Zudem spielen diese Kleingewässer eine wichtige Rolle bei der Abschwächung von Klimafolgen und bei der Klimaanpassung und erbringen vielfältige Ökosystemleistungen, etwa für die Regulierung des Kohlenstoffzyklus, die Wasserversorgung, den Hochwasserschutz, die Grundwasserneubildung oder auch die Naherholung. Allein in Nordostdeutschland gingen allerdings 70 bis 80 % der Sölle und Pfuhe durch Austrocknung verloren – auch in Folge der vergangenen Dürre-Sommer. Welche Folgen das für die Biodiversität und die Ökosystemdienstleistungen hat, ist noch nicht vollständig absehbar.

Gerade Kleingewässer wie die Sölle bieten Lebensraum für viele Arten. Damit erhöhen sie signifikant die Biodiversität in der Landschaft. Dabei haben die Anzahl und räumliche Distanz der Kleingewässer zueinander einen großen Einfluss auf die Artenvielfalt. Je weniger Kleingewässer und je größer die Distanz zwischen ihnen, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Arten diese Gewässer erreichen. Vor allem für Arten, die passiv verteilt werden wie Planktonorganismen oder Arten mit geringer Reichweite, hat die Gewässerdichte einen großen Einfluss. Ein Verlust von Kleingewässern durch Austrocknung oder andere Faktoren ist somit immer ein Verlust von wichtigem Lebensraum. Da man davon ausgehen muss, dass Kleingewässer im Zuge der Klimaerwärmung häufiger austrocknen oder dauerhaft trockenfallen, wird auch die Anzahl und Abundanz von Arten negativ beeinflusst. Tatsächlich deuten die durchgeführten Modellanalysen darauf hin, dass es hier kritische Untergrenzen in der Lebensraumverfügbarkeit gibt, die von der Reichweite der einzelnen Arten abhängen. Für belastbare Zahlen sind hier allerdings weitere Forschungsarbeiten nötig. Kleingewässer sind ja nicht nur Habitate für aquatische Organismen, sondern auch eine wichtige Wasserquelle für Landtiere. Es ist daher wichtig, diesen Lebensraum zu schützen.

Bei den Arbeiten im Rahmen des Projekts "Bridging in Biodiversity Science, BIBS" haben die Forscher DNA und RNA aus der Umwelt genutzt, um ein ganzheitliches Bild der Artenvielfalt im Untersuchungsgebiet zu erhalten. Einerseits nutzten sie die Tiefensequenzierung von Markergenen, um die Verteilung von Organismen – von Bakterien bis zu Säugetieren – in den Kleingewässern und ihrer Umgebung zu verfolgen. Andererseits wurden aus den RNA-Daten die Identität und die Genexpressionsmuster der aktiven Gemeinschaften extrahiert. Die DNA-Ergebnisse aus dem Teichwasser wurden mit denen aus dem Sediment verglichen und es stellte sich heraus, dass es in der Vergangenheit durchaus eine Rolle spielte, ob das Gewässer von einem Wald, einer Wiese oder einem Acker umgeben war, während heute, nach Jahrzehnten intensiver Landnutzung, die biologische Vielfalt mehr oder weniger homogen ist. Die RNA-Analysen ergaben zugleich, dass auch diese homogenen Gemeinschaften noch auf Einträge aus der Umgebung, wie zum Beispiel die Düngung von Feldern, reagieren – wenn auch nur für kurze Zeit. Obwohl also die intensive Landwirtschaft der letzten Jahrzehnte die biologische Vielfalt im Vergleich zu dem früheren Zustand bereits verändert hat, reagieren die Gemeinschaften weiterhin auf die Art der Landnutzung. Um den fortschreitenden Rückgang der biologischen Vielfalt aufzuhalten, ist es daher unerlässlich, die unmittelbaren Auswirkungen der lokalen landwirtschaftlichen Praktiken auf Kleingewässer zu verstehen, und dafür bietet die Umwelt-RNA (eRNA) ein hilfreiches Instrument.

Urbane Kleingewässer sind sehr unterschiedlich und reichen von gepflegten Parkgewässern bis hin zu beinahe vergessenen, eingezäunten Tümpeln. Dementsprechend unterschiedlich ist auch ihre Erholungsnutzung. Grundsätzlich sind Gewässer immer Anziehungspunkte für Erholungssuchende und Spaziergänger. Darüber hinaus sind die für viele Stadtbewohner der erste oder sogar der zentrale Begegnungspunkt mit Natur. Auch wenn innerstädtische Kleingewässer nicht gerade die Hotspots der Biodiversität sind, so sind sie doch sehr wichtige Natur-Erfahrungsstätten. Und sie wirken sich positiv auf das Stadtklima aus, indem sie zusammen mit der mehr oder weniger ausgeprägten Ufervegetation Verdunstungskühle produzieren, was lokal zur Temperatur-

absenkung führt. Wasserrückhalt in der Landschaft ist eine weitere wesentliche Funktion von Kleingewässern, die im Berliner Raum noch ausbaufähig ist. Vielerorts wird das Regenwasser über die Kanalisation abgeleitet und fehlt dann in den Gewässern. In den trockenen Jahren von 2018 bis 2020 sind deshalb auch in Berlin viele Kleingewässer ganz oder beinahe trocken gefallen. Die Stadtplanung muss daher vermehrt den Rückbau versiegelter Flächen im Einzugsgebiet nicht nur der Kleingewässer vorantreiben und Dachentwässerungen u. a. vor Ort versickern lassen.

Die Vereinten Nationen rechnen damit, dass in den nächsten 10 Jahren 1,1 Mrd. mehr Menschen in urbanisierten Gebieten leben werden. Damit einher gehen eine Versiegelung der Landschaft und starke Eingriffe in die Hydrologie von Gewässern. Das ist problematisch, denn Kleingewässer in urbanen Gebieten trocknen infolge höherer Temperaturen und längerer Dürreperioden schon heute öfter aus. Wie der Kleingewässerreport 2020/21 des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) zeigt, weisen 55,3 % der Berliner Gewässer große Mängel auf, etwa weil sie trocken liegen oder sehr stark zugewachsen sind. Nahezu 10 % der Kleingewässer waren nicht mehr als solche erkennbar. Diese dramatischen Zahlen zeigen, dass viele Kleingewässer nicht mehr nur zeitweise austrocknen, sondern komplett verschwinden. Für die Artenvielfalt dieser Ökosysteme ist dies verheerend, denn generell ist die Populationsdichte in urbanen Habitaten oft sehr niedrig. Populationen, die an diese Gewässer gebunden sind, zum Beispiel Amphibien, sind durch lokale Extinktionsereignisse sehr viel stärker gefährdet als Populationen in größeren und besser vernetzten Gewässern. Damit ist zu befürchten, dass die Artenvielfalt noch stärker abnehmen wird. Mit dem zunehmenden Austrocknen der Gewässer und dem Verschwinden von Arten aus der urbanen Landschaft verändern sich auch die Ökosystemfunktionen, etwa das Reinigen der Gewässer, die Verfügbarkeit von Sauerstoff oder die Remineralisierung von Kohlenstoff. Häufigere Wetterextreme gefährden diese wichtigen Funktionen zusätzlich. So produzieren verschmutzte, nährstoffreiche Gewässer deutlich mehr der schädlichen Klimagase Methan und Kohlendioxid. Diesen negativen Konsequenzen gilt es deshalb verstärkt durch nachhaltige Maßnahmen – zum Beispiel durch einen besseren Wasserrückhalt in der Landschaft – entgegenzuwirken.

#### Fachartikel:

Bizic, M., Ionescu, D., Karnatak, R., Musseau, C.L., Onandia, G., Berger, S.A., Nejtgaard, J.C., Lischeid, G., Gessner, M.O., Wollrab, S., Grossart, H.-P. (2022): Land-use type temporarily affects active pond community structure but not gene expression patterns. *Molecular Ecology*. Advance online publication. DOI: 10.1111/mec.16348

Ionescu, D., Bizic, M., Karnatak, R., Musseau, C.L., Onandia, G., Berger, S.A., Nejtgaard, J., Lischeid, G., Gessner, M.O., Wollrab, S., Grossart, H.P. (2021): From microbes to mammals: agriculture homogenizes pond biodiversity across different land-use types. *ARPHA Conference Abstracts*, 4, Article e65062. DOI: 10.3897/aca.4.e65062

Onandia, G., Maassen, S., Musseau, C.L., Berger, S.A., Olmo, C., Jeschke, J.M., Lischeid, G. (2021): Key drivers structuring rotifer communities in ponds: insights into an agricultural landscape. *Journal of Plankton Research*. 43(3), 396–412. DOI: 10.1093/plankt/fbab033

**Weitere Informationen:**

Portal "Ponds for climate"  
[www.ponderful.eu](http://www.ponderful.eu)

Forschungsverbund Urbane Gewässer  
[www.urban-waters.org](http://www.urban-waters.org)

Berlin-Brandenburgisches Institut für Biodiversitätsforschung  
[www.bbib.org/bibs-projekt.html](http://www.bbib.org/bibs-projekt.html)

*(aus: Pressemitteilung Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und  
 Binnenfischerei vom 21. März 2022)*

**Neue Maßnahmen zum Schutz der natürlichen Gewässer vor Spurenstoffen**

Vertreter des Bundesumweltministeriums und des Spurenstoffzentrums des Bundes haben am 22. März 2022 zum Weltwassertag erste Ergebnisse von drei "Runden Tischen" zur Spurenstoffstrategie entgegengenommen. Die Rückstände von Arzneimitteln, Pflanzenschutzmitteln, Bioziden und anderen Chemikalien können schon in geringen Konzentrationen negative Auswirkungen auf Gewässer und die Qualität des Trinkwassers haben. Als Teil der Spurenstoffstrategie des Bundes entwickeln derzeit Interessenverbände an "Runden Tischen" freiwillige Maßnahmen zur Entlastung der Umwelt. Die ersten Ergebnisse haben Vertreter/-innen der "Runden Tische" am Weltwassertag präsentiert. Auf der virtuellen Bilanzveranstaltung wurden außerdem die strategischen Eckpunkte und Perspektiven für die aktuelle Legislaturperiode vorgestellt.

Grundwasser sauber und verfügbar zu halten ist aktiver Umwelt- und Gesundheitsschutz, da 70 % des Trinkwassers aus Grundwasser besteht. Wurde das Grundwasser in der Vergangenheit als etwas Selbstverständliches angesehen, verursacht der Klimawandel immer öfter langanhaltende Trockenperioden, die den Grundwasserspiegel an vielen Orten in Deutschland absenken. Über das Abwasser gelangen zunehmend Stoffe in unsere Gewässer, die dort nicht hingehören. Chemikalien aus der Industrie sowie Arzneimittel, die sich teilweise nicht natürlich abbauen, belasten zusehends die Ökosysteme in Flüssen, Seen und auch das Grundwasser. Dass diese Umweltbelastung ein Ende findet, liegt in der Verantwortung der ganzen Gesellschaft. Wichtig ist, den Eintrag von Schadstoffen – wo immer möglich – direkt an der Quelle abzustellen. Das Spurenstoffzentrum beim Umweltbundesamt soll schon bald zentrale Informationsquelle und Treiberin der Maßnahmen für den Schutz unserer Gewässer werden.

Hauptziel des Spurenstoffzentrums ist es, in Zusammenarbeit mit allen Akteuren und Betroffenen, Oberflächengewässer und das Rohwasser für die Trinkwassergewinnung in Deutschland umfassend und vorsorgend zu schützen. Hierzu sind alle Maßnahmen entlang des Lebenszyklus von Spurenstoffen übergreifend zu betrachten. Es muss bereits bei der Herstellung und der Anwendung von Produkten auf Minimierung, Ersatz oder Vermeidung des Einsatzes von Stoffen mit problematischen Umwelteigenschaften geachtet werden.

Der Eintrag von Spurenstoffen in Seen, Flüsse und schlussendlich in die Meere stellt eine der größten Herausforderung für den

Gewässerschutz dar. Das Problem liegt einerseits in der großen Anzahl dieser Stoffe im täglichen Gebrauch und andererseits darin, dass sie bereits in geringen Konzentrationen Schädigungen bei Wasserlebewesen hervorrufen können. Wesentliches Element der im Jahr 2016 vom Bundesumweltministerium sowie des Umweltbundesamtes initiierten Spurenstoffstrategie ist der intensive Dialog mit Stakeholdern aus Industrie, Wasserwirtschaft, Umweltorganisationen und den Bundesländern. Auf Grundlage von freiwilligen Vereinbarungen und Regeln sollen die Einträge von Spurenstoffen in Gewässer verringert werden. Für die Verstärkung der Spurenstoffstrategie wird seit dem Jahr 2021 das Spurenstoffzentrum des Bundes (SZB) im UBA aufgebaut.

Bereits seit Ende 2019 wurden insgesamt drei stoffspezifische Runde Tische einberufen, die sich an den wichtigsten Spurenstoffen in deutschen Gewässern orientieren: Benzotriazol (Antikorrosionsmittel für Metalle, z. B. zum Schutz von Dachrinnen oder in Reinigungstabs für Geschirrspülmaschinen), Diclofenac (Schmerzmittel) sowie Röntgenkontrastmittel. Schadstoffeinträge in Gewässer lassen sich am effizientesten mindern, wenn die entsprechenden Substanzen nicht bzw. weniger eingesetzt und demnach auch weniger hergestellt werden müssen.

Daher werden im Rahmen der Runden Tische auf Herstellerseite Maßnahmen entwickelt, die die Einträge spezifischer Chemikalien in die Gewässer verringern. Die Runden Tische helfen, die Anwendungsgebiete, Eintragspfade und Risiken für einzelne Spurenstoffe oder Stoffgruppen besser zu verstehen und darauf aufbauend Lösungen im Dialog mit allen beteiligten Akteuren zu erarbeiten. An den Dialogen nahmen Vertreter von Industrieverbänden, der Wasserwirtschaft, der Umweltschutzverbände, der Kommunen sowie der Bundesländer teil.

Der Runde Tisch zu Diclofenac verabschiedete eine einvernehmliche Abschlusserklärung. Darin wurde eine Reihe kurz- bis mittelfristig umsetzbarer Kommunikationsmaßnahmen zusammengestellt, welche die Hersteller auf den Weg bringen wollen. In den Veröffentlichungen des Runden Tisches werden die Umweltprobleme und Gewässerbelastungen durch Diclofenac deutlich dargestellt und die Notwendigkeit einer wesentlichen Reduktion des Eintrags in die Umwelt vermittelt. Da die primäre Eintragsquelle von Diclofenac in die Gewässer dessen Anwendung in Form von Cremes und Salben ist, haben die Hersteller umfassende Informationsmaterialien zur Aufklärung von Ärzten, Apothekern und über Sportverbände erarbeitet, verbunden mit dem eingängigen Slogan "Wischen statt Waschen". Dies umfasst die Empfehlung an Patientinnen und Patienten, nach dem Auftragen von Diclofenac-haltigen Schmerzsalben, die Hände mit einem Papiertuch abzuwischen und dieses über den Restmüll zu entsorgen. Die Effekte dieser Arbeit sollen nun in bis zu drei Regionen Deutschlands evaluiert werden.

Durch den intensiven, konstruktiven und interdisziplinären Austausch der Stakeholder konnten auch erste gemeinsame Maßnahmen an den Runden Tischen zu Röntgenkontrastmittel und Benzotriazol erreicht werden. Für den Rückhalt von Röntgenkontrastmittel, etwa durch die Einführung von Urinbeuteln und Trenntoilette, werden nun drei bis vier große Umsetzungsprojekte, verteilt auf das gesamte Bundesgebiet, entwickelt. Weiterhin werden Pilotstudien gestartet, welche eine spätere Bilanzierung des Erfolgs ermöglichen.

Das Spurenstoffzentrum des Bundes begleitete in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI und einer Agentur zur Kommunikationsforschung die drei Runden Tische zu zuvor von einem unabhängigen Gremium als relevante Substanzen eingeschätzte Spurenstoffen. Das Spurenstoffzentrum wird zukünftig die operativen Tätigkeiten an der Spurenstoffstrategie weiterführen. Dazu gehören unter anderem die Organisation und Begleitung weiterer Runder Tische sowie die Unterstützung eines unabhängigen Gremiums zur Relevanzbewertung von Spurenstoffen.

Der Weltwassertag wurde von der UN-Generalversammlung beschlossen und findet seit 1992 immer am 22. März statt. Diesjähriges Thema war "Groundwater: Making the Invisible Visible" bzw. "Unser Grundwasser: der unsichtbare Schatz".

### Weitere Informationen

Spurenstoffzentrum des Bundes, Umweltbundesamt  
[www.umweltbundesamt.de/das-spurenstoffzentrum-des-bundes](http://www.umweltbundesamt.de/das-spurenstoffzentrum-des-bundes)

*(aus: Gemeinsame Pressemitteilung Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt vom 22. März 2022)*

### Niederschlagstrends entscheiden, wie oft Dürren und Hitzewellen gemeinsam auftreten werden

Langanhaltende Dürren und Hitzewellen haben negative Folgen für Mensch und Umwelt. Treten beide Extremereignisse zur gleichen Zeit auf, können die Auswirkungen zum Beispiel in Form von Waldbränden, Baumschäden und Ernteverlusten noch gravierender ausfallen. Klimaforscher des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) haben nun herausgefunden, dass unter Annahme eines globalen Temperaturanstiegs von 2 °C im Zuge der Erderwärmung die Häufigkeit dieser gleichzeitig auftretenden Extremereignisse vor allem durch lokale Niederschlagstrends bestimmt wird. Das zu wissen ist wichtig, weil man so die Risikoanpassung an den Klimawandel und die Abschätzung seiner Folgen verbessern kann.

Dass sich infolge der globalen Erwärmung über den Landmassen die Temperaturen erhöhen werden und dies die Häufigkeit von Dürreperioden und Hitzewellen zunehmen lässt, gilt als gesichert – genauso wie die Tatsache, dass sich durch den Klimawandel die durchschnittliche Niederschlagsmenge an Land verändert. Unklar war aber bislang, unter welchen Konstellationen beide Extremereignisse gemeinsam auftreten, als sogenannte "compound hot-dry-events". Als solche Ereignisse definierten die UFZ-Forscher Sommer, in denen die Durchschnittstemperatur höher war als in 90 % der Sommer zwischen den Jahren 1950 und 1980 und der Niederschlag gleichzeitig geringer ausfiel als in 90 % der Fälle im selben Vergleichszeitraum. In der Vergangenheit wurden Dürreperioden und Hitzewellen oft separat betrachtet, doch tatsächlich sind beide Ereignisse stark korreliert, was man zum Beispiel an den beiden Extremjahren 2003 und 2018 sehen kann. Die negativen Folgen dieser kombinierten Extreme sind dann oft größer als nur bei einem Extrem. Doch wovon das gleichzeitige Auftreten dieser Extreme in der Zukunft genau abhängt, war bislang nicht bekannt – zu groß waren die Unsicherheiten, die die Forschung bei der Simulation bisheriger Klimamodelle in Kauf nehmen mussten.

Die Forscher nutzten nun ein neues, aus sieben Klimamodellen bestehendes Modellensemble, um diese Unsicherheiten zu reduzieren. Darin wurde jede Modellsimulation bis zu 100 Mal durchgeführt, um die natürliche Klimavariabilität abzudecken. Sie betrachteten den historischen Zeitraum der Jahre 1950 bis 1980 und verglichen die Ergebnisse mit denen eines potenziellen um zwei Grad wärmeren Klimas (im Vergleich zum vorindustriellen Niveau). Der Vorteil dieser Mehrfachsimulationen besteht darin, dass der Datenumfang viel größer ist als bei herkömmlichen Modellensembles und daher kombinierte Extreme besser abgeschätzt werden können. Bestätigen konnten die Forscher mit der Modellierung die bisherige Annahme, dass die durchschnittliche Häufigkeit gleichzeitiger Dürre- und Hitzeereignisse künftig zunimmt: Lag diese zwischen 1950 und 1980 noch bei 3 %, was statistisch gesehen alle 33 Jahre auftritt, wird sie in einem 2 °C wärmeren Klima rund 12 % betragen. Das wäre eine Vervierfachung im Vergleich zum historischen Zeitraum.

Neu ist nun, dass die Klimaforscher durch die Simulationen feststellen konnten, dass es nicht Temperatur-, sondern Niederschlagstrends sind, die über die Häufigkeit gleichzeitiger Dürre- und Hitzeereignisse in Zukunft entscheiden. Der Grund: Selbst bei einer moderaten Erwärmung von 2 °C wird der lokale Temperaturanstieg so groß sein, dass künftig alle Dürren überall auf der Welt mit Hitzewellen einhergehen, unabhängig, um wie viel Grad genau sich lokal die Temperatur verändert. Die Unsicherheit in der Häufigkeitsvorhersage lag nur bei 1,5 %. Damit scheidet die Temperatur als entscheidende Dimension für die Unsicherheit aus. Anders der Niederschlag, für den die Forscher eine Unsicherheit von bis zu 48 % berechneten: Damit entscheidet die lokale Niederschlagsmenge, ob gleichzeitig Dürreperioden und Hitzewellen auftreten werden. Für Zentraleuropa bedeutet das zum Beispiel in der Prognose, dass im Fall eines "feucht"-Szenarios mit Zunahme des Niederschlags im Schnitt alle 10 Jahre gleichzeitige Dürreperioden und Hitzewellen auftreten, im Falle eines "trocken"-Szenarios bei abnehmenden Niederschlägen dagegen mindestens alle 4 Jahre. Für Zentral-Nordamerika würden solche Ereignisse alle 9 Jahre ("feucht"-Szenario) und 6 Jahre ("trocken"-Szenario) erwartet. Diese regionalen Szenarien der Niederschlagstrends können als Grundlage für Anpassungsentscheidungen genutzt werden, um zum Beispiel Best- und Worst-Case-Szenarien zu evaluieren.

Doch auch wenn man weiß, dass Niederschlagstrends maßgebend sind für das Auftreten von gleichzeitigen Dürren und Hitzewellen, ist es immer noch schwierig, sie sicherer vorherzusagen: Durch den Klimawandel kann sich die Verteilung von Niederschlägen in bestimmten Regionen verschieben. Das Niederschlagsregime hängt von der atmosphärischen Zirkulation ab, die durch Wechselwirkungen über große Teile des Erdballs die regionale Wetterdynamik bestimmt. Weil die Dynamik vieler dieser Prozesse noch nicht vollständig verstanden ist, ist es schwer, diese Unsicherheiten weiter zu reduzieren.

Die Erkenntnis, dass ein Trend einer Variablen das künftige Auftreten von zwei gleichzeitigen Extremereignissen bei einem globalen Temperaturanstieg von 2 °C bestimmt, lässt sich auch bei anderen kombinierten Extremen nutzen. Das gilt zum Beispiel für das Zusammenwirken von tropischen Stürmen und Hitzewellen oder in den Ozeanen von marinen Hitzewellen und der Versauerung. Dort ist jeweils der Trend in der Sturmfrequenz oder der Ozeanversauerung der entscheidende Faktor,

der über das gleichzeitige Auftreten der beiden Extremereignisse in Zukunft entscheidet.

#### Fachartikel:

Bevacqua, E., Zappa, G., Lehner, F., Zscheischler, J. (2022): Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events. *Nature Climate Change*.

DOI: 10.1038/s41558-022-01309-5

#### Weitere Informationen:

UFZ-Department Hydrosystemmodellierung  
www.ufz.de/index.php?de=34211

(aus: Pressemitteilung Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung vom 10. März 2022)

## Feuchtgebiete und Moore weltweit schützen

Feuchtgebiete gehören zu den vielseitigsten und zugleich gefährdetsten Ökosystemen der Erde. Seen und Flüsse, Moore und Sümpfe, Korallenriffe und Mangrovenwälder sind nicht nur als Lebensräume für seltene und bedrohte Tier- und Pflanzenarten schützenswert. Sie stellen auch für den Menschen lebenswichtige Ökosystemleistungen bereit. Intakte Feuchtgebiete versorgen uns mit Trinkwasser und Nahrung, verbessern die Wasserqualität und schützen uns vor Naturkatastrophen wie Überschwemmungen. Sie können als langfristige Kohlenstoffspeicher einen wichtigen Beitrag zum natürlichen Klimaschutz leisten. Wir müssen diese fragilen Ökosysteme daher dringend schützen, um gegen die Klimakrise und den weltweiten Biodiversitätsverlust anzugehen.

Anlässlich des jährlichen Welttags der Feuchtgebiete ruft das Sekretariat der Internationalen Feuchtgebietskonvention (Ramsar-Konvention) zum Handeln auf und weist auf die Aktion "Wetlands action for people and nature" hin. Das Bundesumwelt- und Verbraucherschutzministerium (BMUV) unterstützt weltweit Feuchtgebiete und Moore, um die fortschreitende Klimakrise und den Verlust der Artenvielfalt zu begrenzen. Im Rahmen der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) werden bereits elf Projekte gefördert. Im Jahr 2022 starten weitere vier Vorhaben, darunter ein zum 1. Januar 2022 angelaufenes regionales Vorhaben zur Sicherung wichtiger Biodiversitäts-, Kohlenstoff- und Wasserspeicher in den Mooren des Kongobeckens.

Auf nationaler Ebene engagiert sich Deutschland für den Erhalt von Feuchtgebieten, indem aktuell bereits 35 Gebiete mit insgesamt 869.000 ha im gesamten Bundesgebiet als "Feuchtgebiete von internationaler Bedeutung" ausgewiesen wurden. Auch international setzt sich Deutschland für die Erhaltung, die Wiederherstellung, die Vernetzung sowie das nachhaltige Management von Feuchtgebieten ein. So werden im Rahmen der Internationalen Klimaschutzinitiative (IKI) des BMUV aktuell elf Projekte in Höhe von insgesamt 52 Mio. € gefördert.

Auch im Jahr 2022 wird das BMUV vier weitere Vorhaben mit einem Gesamtvolumen von 32 Mio. € im Rahmen der IKI starten, allen voran mit einem zum 1. Januar angelaufenen regionalen Vorhaben zur Sicherung wichtiger Biodiversitäts-, Kohlenstoff- und Wasserspeicher in den Mooren des Kongobeckens. Die seit dem Jahr 2017 kartierten Moore der "Cuvette Centrale" in der

Republik Kongo und der Demokratischen Republik Kongo sind mit schätzungsweise 145.000 km<sup>2</sup> (ca. 30 Gigatonnen Kohlenstoff) der größte zusammenhängende tropische Moorkomplex der Welt. Sie beherbergen eine beeindruckende Artenvielfalt: Hier gibt es verschiedene Schutzgebiete, darunter mehrere Ramsar-Feuchtgebiete wie das "Ngiri-Tumba-Maindombe-Gebiet" – mit 6,7 Mio. ha das zweitgrößte Feuchtgebiet der Welt, das im grenzüberschreitenden Gebiet des Télé-/Tumba-Sees liegt.

Das Gebiet enthält die größte kontinentale Süßwassermasse Afrikas und ist damit eines der wichtigsten Feuchtgebiete Afrikas und eine der wichtigsten Süßwassermassen der Welt. Um diesen Lebensraum zu erhalten, wird das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gemeinsam mit weiteren Partnern über sechs Jahre lang Aktionspläne für gefährdete Arten entwickeln und in Pilotprojekten erproben. Außerdem soll ein geeigneter Managementplan zur Erhaltung der Wasserressourcen erarbeitet werden, der auch ein Monitoringsystem für die Moore umfasst. Allein für diese Maßnahmen hat die IKI 15 Mio. € zur Verfügung gestellt.

Die Ramsar-Konvention wurde am 2. Februar 1971 in der iranischen Stadt Ramsar von damals 18 Vertragsstaaten unterschrieben. Jährlich wird am 2. Februar mit dem "Weltfeuchtgebietstag" auf die Bedeutung von Feuchtgebieten und das Bestehen dieses völkerrechtlichen Abkommens hingewiesen. Die Internationale Feuchtgebietskonvention bildet als zwischenstaatliches Übereinkommen den Rahmen für nationale Maßnahmen und internationale Zusammenarbeit zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung von Feuchtgebieten und deren Ressourcen. Aktuell gehören der Konvention weltweit 172 Vertragsstaaten an (Stand: Januar 2022), die insgesamt 2.435 Feuchtgebiete internationaler Bedeutung mit einer Gesamtfläche von mehr als 2,5 Mio. m<sup>2</sup> gemeldet haben. Die Vertragsstaatenkonferenzen (COP) finden alle drei Jahre statt, die letzte (COP 13) im Oktober 2018 in Dubai (Vereinigte Arabische Emirate). Die nächste Vertragsstaatenkonferenz wird voraussichtlich im November 2022 in Wuhan, China stattfinden und unter anderem die Vertragsstaaten zur Wiederherstellung degradierter Feuchtgebiete auffordern.

#### Weitere Informationen:

Ramsar-Konvention, Bundesumweltministerium  
www.bmu.de/themen/naturschutz-artenvielfalt/naturschutz-biologische-vielfalt/biologische-vielfalt-international/ramsar-konvention

Schutz von Feuchtgebieten im Kontext der Ramsar-Konvention, Bundesamt für Naturschutz  
www.bfn.de/schutz-von-feuchtgebieten-im-kontext-der-ramsar-konvention

Ramsar-Konvention  
www.ramsar.org

Kampagne "Wetlands action for people and nature"  
www.worldwetlandsday.org

Internationale Klimaschutzinitiative, IKI  
www.international-climate-initiative.com

(aus: Pressemitteilung Bundesumweltministerium vom 2. Februar 2022)

## Das Potenzial von Mooren zur Aufbereitung von Bergbaubwässern

Die Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässern mit Sulfat und Eisen aus Grubenwasser ist ein weltweites Problem in ehemaligen Bergbaugebieten. Forschende der Humboldt-Universität zu Berlin (HU-Berlin) sowie vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) haben im Labor gezeigt, dass Moorboden die Eisen- und Sulfatbelastung von Grubenwasser erheblich mindern kann.

Während und nach dem Abbau von Braun- und Steinkohle reagiert pyrithaltiges Aushubmaterial mit Sauerstoff und Wasser zu Schwefelsäure und gelöstem Eisen. Sulfat und Eisenverbindungen sowie ein saurer pH-Wert sind die Faktoren, die Grubenwasser zu einer Belastungsquelle für Gewässer machen. Es gibt zahlreiche Verfahren zur Behandlung von saurem Grubenwasser, die jedoch oft kostspielig und schwierig umzusetzen sind. Die stark belastete ehemalige Bergbaulandschaft in der Lausitz ist ein Beispiel für die Grenzen von Sanierungsmethoden. Dort finden sich hohe Konzentrationen von Eisen und Sulfat in Flüssen – wie der Spree – Seen und Grundwasserleitern. Punktuelle Behandlungen verbesserten die Wasserqualität nicht.

Naturbasierte Methoden in der Landschaft sind bisher wenig erforscht. Die Wiedervernässung von Mooren könnte eine effektive Maßnahme sein. Unter sauerstofffreien Bedingungen sollte in wassergesättigten Moorböden im Idealfall wieder Pyrit gebildet und gleichzeitig Eisen und Schwefel entfernt werden, um so eine erneute Pyritoxidation zu verhindern. Im Vergleich zu anderen organischen Substraten war bisher jedoch nicht klar, inwieweit der zersetzte Torf aus den oberen Bodenschichten trockengelegter Moore geeignet ist.

Die Forschenden simulierten im Laborexperiment die Wiedervernässung von Moorland mit saurem Grubenwasser. Anschließend quantifizierten sie die Eisen- und Sulfatentfernung und die pH-Änderungen bei unterschiedlichen Belastungsraten. Der anfänglich niedrige pH-Wert von 4 stieg auf 6 an, und die elektrische Leitfähigkeit sank um bis zu 47 %. Die Leitfähigkeit des Wassers ist ein Maß für die im Wasser gelösten Teilchen und damit im Süßwasser auch ein Indikator für die Qualität des Wassers. Die anfänglich hohen Konzentrationen von Eisen (mehr als 250 mg/l) und Sulfat (über 770 mg/l) sanken im Durchschnitt um 87 % beziehungsweise um 78 %.

Die Ergebnisse implizieren, dass der mikrobielle Abbau von Sulfat und eine anschließende Ausfällung von Eisensulfiden der wichtigste Mechanismus bei der Reduzierung der Verschmutzungen war. Je niedriger die hydraulische beziehungsweise stoffliche Belastung, desto mehr Sulfat wurde entfernt. Die hydraulische Belastung bestimmt die Verweilzeit und je höher diese ist, desto kürzer hat das Grubenwasser Kontakt mit dem Moorsubstrat.

Die Wiedervernässung von Mooren wäre damit eine wirksame Maßnahme zur Verringerung der Verschmutzung durch saures Grubenwasser. Für den stark belasteten untersuchten Abschnitt der Spree konnten die Forschenden anhand des Vernässungsexperiments und umfangreichen Felddaten abschätzen, dass

eine Verringerung der Sulfatbelastung des Flusses um etwa 20 % (36.827 t/Jahr) eintreten wird, wenn alle Moore im Teileinzugsgebiet wiedervernässt werden. Das wären 6.067 ha und entspräche 6,7 % der Gesamtfläche.

Die Ergebnisse zeigen einmal mehr, dass die Wiedervernässung von Mooren eine wichtige Maßnahme für den Schutz unserer Umwelt ist. Moore stabilisieren den globalen Kohlenstoffhaushalt, sie halten das Wasser in der Landschaft und haben überdies eine wichtige Reinigungsfunktion.

Die Forschenden betonen, dass die Laborversuche nicht ohne Weiteres auf großskalige Freilandbedingungen übertragen werden können. Zukünftig muss untersucht werden, ob der Schadstoffabbau in zersetzten Torfschichten aufgrund von Versauerung oder dem Mangel an bioverfügbarem Kohlenstoff – oder beidem – im Laufe der Zeit abnimmt und wie sich die Wiedervernässung mit saurem Grubenwasser langfristig auf die Wiederherstellung der wichtigen weiteren Funktionen von Mooren auswirkt.

Biogeochemische Prozesse in Mooren unterliegen natürlicherweise einer hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität. Die wesentlichen Gründe dafür sind Temperaturschwankungen und hydrologische Änderungen im Jahresverlauf sowie kleinräumige Unterschiede in den physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften. Die Bedeutung von einzelnen Steuergrößen für die Reinigung von Bergbaubwässern lässt sich daher zunächst am besten unter kontrollierten Laborbedingungen untersuchen. Die Übertragung der Ergebnisse auf das Freiland ist dann unter bestimmten Annahmen möglich und sollte aber durch weitere Untersuchungen im Labor und Freiland unterlegt werden.

Moore haben als Übergangs- und Pufferzonen zwischen terrestrischen und aquatischen Ökosystemen eine wichtige Funktion für den Stoff- und Wasserhaushalt in der Landschaft. Wachsende bzw. nicht entwässerte Moore sind wichtige Senken für Kohlenstoff, Phosphor und Stickstoff. Die gleichzeitige Speicherung von Wasser hat zur Bezeichnung "Nieren in der Landschaft" beigetragen. Fallen Moorflächen trocken, können sie im Gegenzug Nährstoffe und Treibhausgase freisetzen.

### Fachartikel:

Roesel, L.K., Zak, D.H. (2022): Treating acid mine drainage with decomposed organic soil: Implications for peatland rewetting. *Journal of Environmental Management*, Volume 311, 2022, 114808, ISSN 0301-4797.  
DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114808

### Weitere Informationen:

Programmbereich "Aquatische Stoff- und Energieflüsse im globalen Wandel", IGB  
[www.igb-berlin.de/pb-2-aquatische-stoff-und-energiefluesse-im-globalen-wandel](http://www.igb-berlin.de/pb-2-aquatische-stoff-und-energiefluesse-im-globalen-wandel)  
Department of Ecoscience, Aarhus University  
[www.ecos.au.dk/en](http://www.ecos.au.dk/en)

(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei vom 23. März 2022)

## Projekt CREATE als Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung

Wenn Meere und Küsten unter dem Klimawandel oder einer wenig nachhaltigen Nutzung leiden, wirkt sich das auf die Natur, aber auch auf das menschliche Wohlbefinden aus – nicht zuletzt kommt etwa ein Teil unserer Nahrung aus dem Meer oder wir verbringen unsere Freizeit an der Küste. Die Interaktion zwischen Menschen und Meer möglichst nachhaltig zu gestalten, ist ein Ziel des gestarteten Verbundprojekts CREATE unter Leitung von Biodiversitätsexperten der Universität Oldenburg. Es ist eines von insgesamt sieben Projekten in der zweiten Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) mit dem Titel "Schutz und nachhaltige Nutzung mariner Räume".

Mensch und Meer bilden ein sozio-ökologisches System. Die vielfältigen menschengemachten Eingriffe in küstennahe Meeresökosysteme führen zunehmend zu Nutzungskonflikten. Ob Tourismus oder Düngereinsatz in der Landwirtschaft, ob Sedimentverklappung in Küstengewässern, die Schifffahrt oder der Ausbau erneuerbarer Energien: Angesichts der diversen Stressoren, die sich gegenseitig beeinflussen und oft den Zielen des Meeresschutzes zuwiderlaufen, gilt es integrierte Konzepte zu entwickeln.

Um konkrete Lösungen zu entwickeln, arbeiten im Projekt CREATE daher Expertinnen und Experten aus Natur- und Sozialwissenschaften, Ökonomie, Ingenieurwissenschaften und Gesellschaft zusammen. Sie werden in der Nord- und Ostsee drei sogenannte Reallabore etablieren und dort ihre Methoden zusammenbringen, um praktisch umsetzbare, innovative Lösungen zu entwickeln. Die Standorte sind die Naturschutzgebiete Borkum Riffgrund und Sylter Außenriff sowie die Eckernförder Bucht.

Reallabore sind ein vergleichsweise neuer Ansatz in den Meeresumweltwissenschaften. Ihr Kern besteht darin, mit allen Betroffenen Maßnahmen für eine nachhaltigere Nutzung und effektiven Schutz zu entwickeln und diese dann gemeinsam in den konkreten Regionen umzusetzen. In CREATE beginnt dieser Prozess mit einer systematischen Analyse aller einzubeziehenden Personenkreise und soll in wissenschaftlich fundierte Handlungsempfehlungen münden. Diese werden Politik, Wirtschaft und Gesellschaft als Grundlage künftiger Entscheidungen zur Verfügung stehen.

Neben Forschenden der Arbeitsgruppe Planktologie am Institut für Chemie und Biologie des Meeres der Universität Oldenburg (ICBM) und des Helmholtz-Instituts für Funktionelle Marine Biodiversität (HIFMB) sind am Projekt Expertinnen und Experten 14 weiterer Partnerinstitutionen beteiligt. Dies sind die Universitäten Kiel, Rostock und Greifswald, die Humboldt-Universität zu Berlin, die Tierärztliche Hochschule Hannover, das Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, die Helmholtz-Zentren für Umweltforschung (Leipzig) und Ozeanforschung (Kiel), das Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung in Bremen, das Leibniz-Institut für Ostseeforschung in Warnemünde, das Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen, Senckenberg am Meer (Wilhelms-haven), das Johann Heinrich von Thünen-Institut in Bremerhaven sowie das Deutsche Institut für Entwicklungspolitik. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das län-

gerfristig angelegte Projekt CREATE mit zunächst etwa 4 Mio. € über einen ersten Zeitraum von 3 Jahren.

### Weitere Informationen:

Portal "Planktologie", Universität Oldenburg  
[www.uol.de/icbm/planktologie](http://www.uol.de/icbm/planktologie)

Deutsche Allianz Meeresforschung, DAM  
[www.allianz-meeresforschung.de](http://www.allianz-meeresforschung.de)

(aus: Pressemitteilung Universität Oldenburg vom 10. Februar 2022)

## Windkanal-Experimente lieferten Daten für die Vorhersage von Starkregen, Hagel- und Graupel-niederschlag

Das Tief "Bernd" hat im Sommer 2021 die Gefahren extremer Niederschlagsereignisse mit katastrophalen Überschwemmungen besonders drastisch demonstriert. Und Wetteraufzeichnungen zeigen, dass in den mittleren Breiten Extremereignisse wie Trockenheit, aber auch Starkregen oder Hagel im Zusammenhang mit dem Klimawandel häufiger und ihre Auswirkungen heftiger werden. So können Hagelkörner schwere Schäden in der Landwirtschaft, an Gebäuden und Fahrzeugen hinterlassen sowie für Mensch und Tier gefährlich werden. Umso wichtiger ist es, dass Wettermodelle das Auftreten und das Ausmaß von Niederschlägen bestmöglich vorhersagen. Diese Computermodelle müssen allerdings die relevanten wolkenphysikalischen Prozesse mathematisch präzise formuliert enthalten.

Hierzu liefert der weltweit einmalige vertikale Windkanal der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) essenzielle Ergebnisse durch neue Experimente, die mit künstlichen Hagelkörnern aus einem 3D-Drucker durchgeführt werden. Ein Wissenschaftlerteam hat dabei herausgefunden, dass die Form der Hagelkörner entscheidend für ihre Geschwindigkeit vor dem Aufschlag ist. Die Atmosphärenphysiker konnten zeigen, dass genoppte Hagelsteine eine geringere kinetische Energie und somit weniger Zerstörungskraft besitzen als ungleichmäßig geformter glatter Hagel.

Hagel und Graupel entstehen, wenn Wassertropfen in Gewitterwolken gefrieren. Turbulenzen und komplexe physikalische Prozesse innerhalb dieser sehr hoch reichenden Wolken führen zum Gefrieren des Wassers. Erreichen diese Eisteilchen beim Herunterfallen wärmere Schichten, schmelzen sie. So entstehen große, kalte Regentropfen, die den häufig extremen Niederschlag bilden. Reicht die Fallzeit der Eisteilchen bis zum Boden nicht aus, um sie vollständig zu schmelzen, so besteht der Niederschlag aus Graupel oder Hagel.

Je nach Bedingungen in der Wolke erhalten die gefrorenen Teilchen ihre charakteristische Form, Größe und Masse. Das Wissenschaftlerteam konnte in ihren Experimenten mit echten Hagelkörnern zeigen, wie sie beim Schmelzen zu Regentropfen werden, die mehrere Millimeter groß sind. Auch zerplatzen große Hagelsteine während des Schmelzprozesses, wobei zahlreiche kleine Wassertröpfchen entstehen. Die Wissenschaftler leiteten aus den Messungen Parametrisierungen als wesentliche Bestandteile für die numerische Simulation von Wolken und Niederschlag in Computermodellen ab.

Für die Experimente stellte das Mainzer Team echte Hagel- und Graupelkörner im Labor her und analysierte im vertikalen Windkanal unter realen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen, wie genau die Körner fallen beziehungsweise schmelzen. Zusätzlich erzeugten die Wissenschaftler nach Vorlagen realer Körner mit einem 3D-Drucker künstliche Hagel- und Graupelkörner, bei denen sogar die Materialdichte mit Eis übereinstimmte. Hiermit können die Strömungseigenschaften der fallenden Objekte gemessen werden, was für die mikrophysikalischen Prozesse der Extremniederschläge besonders wichtig ist.

In dem 6 m hohen Windkanal schwebten die Hagel- und Graupelkörner frei in einem künstlich erzeugten, vertikalen Luftstrom. Dabei wurden sie mithilfe von Hochgeschwindigkeits- und Infrarotkameras sowie einem speziell entwickelten holografischen Bildaufzeichnungssystem beobachtet. Wendet man die durch diese Experimente gewonnene mikrophysikalische Beschreibung des Niederschlags auf Modelle zur Berechnung von Gewitterwolken an, kann man ihre Folgen besser voraussagen. Dies ist besonders in Hinblick auf die infolge des Klimawandels zu erwartende Zunahme von Extremereignissen wie Trockenheit und Starkregen sehr wichtig.

Die Mainzer Experimente wurden im Rahmen des HydroCOMET-Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durchgeführt.

#### **Fachartikel:**

Theis, A., Mitra, S.K., Diehl, K., Zanger, F., Szakáll, M., Heymsfield, A., Borrmann, S. (2021): Vertical wind tunnel experiments and a theoretical study on the microphysics of melting low-density graupel. *Journal of Atmospheric Sciences*, 31. Dezember 2021. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0162.1

Theis, A., Diehl, K., Mitra, S.K., Borrmann, S., Szakáll, M. (2021): Melting of atmospheric ice particles. In: Michaelides, S. (Hrsg.) (2021): *Precipitation Science – Measurement, Remote Sensing, Microphysics and Modeling*. Elsevier, 2021. ISBN: 9780128229736

Theis, A., Mitra, S.K., Szakáll, M., Heymsfield, A., Borrmann, S. (2020): A Wind Tunnel Investigation into the Aerodynamics of Lobed Hailstones. *Atmosphere* 11: 5, 12. Mai 2020. DOI: 10.3390/atmos11050494

#### **Weitere Informationen:**

Institut für Physik der Atmosphäre, Universität Mainz  
[www.ipa.uni-mainz.de](http://www.ipa.uni-mainz.de)

*(aus: Gemeinsame Pressemitteilung Universität Mainz und Max-Planck-Institut für Chemie vom 22. März 2022)*

### **"Aktionstag Starkregenrisikomanagement" für neue Visualisierungs-Tools und Erfahrungsaustausch**

Der Klimawandel bringt nicht nur steigende Temperaturen, sondern auch Wetterturbulenzen mit sich. Dazu gehören Unwetter wie im Jahr 2021 im Ahrtal, wo die Menschen noch immer unter den Folgen der Flutkatastrophe leiden. Auch in Baden-Württemberg und der Region Biberach gingen in den vergangenen

Jahren immer wieder unwetterartige Regengüsse nieder. Experten der Hochschule Biberach (HBC) befassten sich daher mit derartigen Starkregenereignissen.

Das Expertenteam entstammt der Fakultät Bauingenieurwesen und Projektmanagement u. a. für Wasser- und Flussbau sowie Gewässerökologie. In zahlreichen Lehr- und Forschungsprojekten untersuchen sie, welche Gefährdung von Starkregen und Hochwasser ausgeht und welche Maßnahmen Schäden minimieren oder gar verhindern können. Ein besonderes Augenmerk legten die Wasserbauer auf das Starkregenrisikomanagement und die Erstellung von Gefahrenkarten. Hierzu hat das Land Baden-Württemberg bereits im Jahr 2019 einen Leitfaden herausgegeben, doch in der Umsetzung sammelten bisher alle Beteiligten neue Erfahrungen. Deshalb hat das Forscherteam in Zusammenarbeit mit der Akademie der Hochschule Biberach den "Aktionstag Starkregen" angesetzt. Das Seminar fand am 29. März 2022 statt und stellte eine wichtige Plattform für Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer dar. Zielgruppen sind Planungsbüros, Kommunen, Landkreise sowie – erstmals – die Landwirtschaft, die ebenso einen wichtigen Beitrag leisten kann, zum Beispiel um Bodenerosionen zu vermeiden.

Einen weiteren Schwerpunkt setzte der Aktionstag im Bereich Kommunikation von Starkregengefahren in der Stadtplanung. Wichtige Tools boten hier 3D-Visualisierung und Datenaustausch. Ebenso wichtig war der Blick auf Ereignisse, die in der Vergangenheit stattgefunden haben und von Kommunen, Feuerwehren oder Katastrophenschutz bekämpft wurden. Diese gewonnen Erkenntnisse sind sehr wertvoll im Umgang mit der Thematik.

Für die ganztägige Veranstaltung hatte die Hochschule Biberach zahlreiche Fachleute als Referenten gewonnen, die aus allen für das Thema relevanten Bereichen kamen – etwa aus der Bezirksregierung Köln, dem Regierungspräsidium Tübingen, regionalen Ämtern für Gewässer und Abwasser, Bau- und Umwelt, Landwirtschaft sowie Brand- und Katastrophenschutz. Ingenieure aus Planungsbüros brachten ebenso ihre Erfahrungen aus durchgeführten Projekten ein wie auch Professoren der Hochschule Biberach aus den Lehr- und Forschungsgebieten Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau.

#### **Weitere Informationen:**

Fakultät Bauingenieurwesen und Projektmanagement,  
Hochschule Biberach  
[www.hochschule-biberach.de/hochschule/profil-der-hbc/bauingenieurwesen-und-projektmanagement](http://www.hochschule-biberach.de/hochschule/profil-der-hbc/bauingenieurwesen-und-projektmanagement)

Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg  
<https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/47871>

*(aus: Online-Mitteilung Hochschule Biberach vom 21. Februar 2022)*

### **Lebensader Aller – Vielfalt eines norddeutschen Kleinods erhalten**

Die Aller ist das wichtigste Verbindungsgewässer zwischen Nordsee und Harz. Mit dem Projekt "AllerVielfalt Verden" wird ein Biotopverbund von nationaler Bedeutung entwickelt.

Auf ihrem etwa 260 km langen Weg in die Weser stellt die Aller das wichtigste Vernetzungselement im Weser-Allertal dar. Zwischen Celle und der Mündung in die Weser, einst eine wichtige Schifffahrtsstraße, finden sich auch heute noch vielfältige und herausragende Lebensräume für Tiere und Pflanzen. Für sie soll mehr Lebensraum erhalten und entwickelt werden.

Die Aller ist ein für Norddeutschland typischer sand- und lehmgeprägter Tieflandfluss. Naturräumlich ist die Aller der Weser-Aller-Flachlandebene zugeordnet. Der Fluss fließt von der Magdeburger Börde in Richtung Nordwesten bis zur Mündung in die Weser bei Verden. Es geht vorbei an Wolfsburg, Celle und Rethem. Charakteristisch ist der gefällearme Verlauf: Auf der gesamten Strecke werden nur circa 40 Höhenmeter überwunden. Außerdem sind für die Aller winterliche Hochwässer und eine langanhaltende sommerliche Niedrigwasserphase typisch. Allerdings treten auch im Sommer vereinzelt Hochwasser auf, sodass die Auen durchschnittlich an 40 Tagen im Jahr überflutet sind.

In der Saaleeiszeit hat sich die Aller durch Aufnahme der Schmelzwässer im 20 km breiten Urstromtal ihren Weg gebahnt und dabei bedingt durch die häufigen Hochwässer eine Vielzahl von mäandrierenden Strömungsrinnen, Altarmen und Altgewässern geschaffen. In der nachfolgenden Weichseleiszeit wurden am nördlichen Rand der Aue Binnendünen aufgeweht. Heute finden wir neben feuchten Lebensräumen wie nährstoffarmem Grünland, Brüchen und Mooren außerdem grundwasserunabhängige Sandtrockenrasen auf höher gelegenen Standorten.

Die erste Förderphase des Renaturierungsprojekts wurde mit Projekteröffnung am 13. Januar 2022 begonnen. Vertreter des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) haben gemeinsam mit dem Land Niedersachsen den Förderbescheid über 5,1 Mio. € für die erste Förderphase an den Naturschutzbund Deutschland (NABU) und den Landkreis Verden digital überreicht. Das vom NABU initiierte Vorhaben soll an der Allerniederung auf einem Projektgebiet von 2.350 ha naturnahe Strukturen schaffen und wird dabei auch die Interessen von Landwirtschaft und Freizeitnutzung im Blick haben. Flutrinnen, Kleingewässer und Altarme wie die "Alte Aller" sollen wiederangebunden und Deiche rückverlegt werden. Das BfN begleitet und fördert das Projekt mit Mitteln des Bundesumwelt- und Verbraucherschutzministeriums im Förderprogramm Auen.

Auen sind einer der artenreichsten, aber auch gefährdetsten Lebensräume Deutschlands. Gewässer- und Auenrenaturierungen dienen als natürlicher Hochwasserschutz und verbessern die Wasserqualität der Flüsse. Mit dem Projekt "AllerVielfalt Verden" ergibt sich für den NABU die Chance, an einer weiteren Bundeswasserstraße Naturschutzmaßnahmen umzusetzen und so die Biodiversität in der Allerniederung nachhaltig zu stärken. Der NABU konnte bereits langjährige Erfahrungen auf diesem Gebiet sammeln: mit Europas größtem Flussrenaturierungsvorhaben – dem Havel-Projekt.

Im Projekt werden Auenbiotope wie Auengehölze, artenreiches Grünland und Gewässerrandsteifen entwickelt, mit dem Ziel, die Ufer- und Auenlebensräume aufzuwerten. Im Dialog mit allen Flächeneigentümern und Nutzenden in der Allerniederung werden gemeinsam fachlich sinnvolle und gleichzeitig sozialverträgliche Maßnahmen identifiziert und umgesetzt. Neben NABU und

Landkreis Verden konnte auch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Zusammenarbeit gewonnen werden, die im Oktober 2020 in Verden mit einer Kooperationsvereinbarung besiegelt wurde

Die Umsetzung von Maßnahmen im Fluss selbst liegt in der Hand des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamts Weser. Maßnahmen in der Aue werden von NABU und Landkreis Verden durchgeführt. Für die Projektleitung ist der Landkreis Verden, Abteilung Naturschutz, verantwortlich. Für das operative Geschäft mit der fachlichen Betreuung von Maßnahmen wird ein NABU-Projektbüro beim Ökozentrum Verden eingerichtet.

Das Projekt "AllerVielfalt Verden" ist das dritte und mit einem Gesamtbudget von 16,86 Mio. € bislang größte Vorhaben im Förderprogramm Auen. Es wird zunächst bis Ende 2025 mit 5,1 Mio. € gefördert.

Zusätzlich zu den rund 4,2 Mio. € an Bundesmitteln aus dem Förderprogramm Auen des "Blauen Band Deutschland" steuert das Land Niedersachsen in der ersten Förderphase finanzielle Mittel in Höhe von 900.000 € bei, um die Allerniederung im Landkreis Verden zu renaturieren.

Mit einer Laufzeit von insgesamt zehn Jahren sowie einem Projektgebiet von 2.350 ha und 30 Flusskilometern haben sich der NABU und der Landkreis Verden umfangreiche Ziele gesetzt.

#### **Weitere Informationen:**

Projektseite "Lebensader Aller", Naturschutzbund Deutschland [www.nabu.de/natur-und-landschaft/fluesse/allerniederung](http://www.nabu.de/natur-und-landschaft/fluesse/allerniederung)

*(aus: Pressemitteilung Naturschutzbund Deutschland vom 13. März 2022)*

### **Bundesförderung für Projekt zu Starkregenereignissen**

Die Flutkatastrophe im Ahrtal, aber auch die bekannten Starkregenereignisse der letzten Jahre in Deutschland haben die Notwendigkeit der Entwicklung adäquater Hochwasservorsorgemaßnahmen sowie einer geeigneten Risikokommunikation unmissverständlich vor Augen geführt, um den Folgen des Klimawandels geeignet begegnen zu können. In diesem Zusammenhang wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein Forschungsvorhaben mit einem Umfang von 2,5 Mio. € im Rahmen der Förderlinie "Wasser-Extremereignisse" bewilligt, innerhalb dessen ein Konsortium aus sechs Partnern und unter zentraler Beteiligung des Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier ein intelligenter Weg zur nachhaltigen Umsetzung von Hochwasservorsorgemaßnahmen in urbanen Räumen gefördert wird.

Neben einer Weiterentwicklung von High-Tech-Methoden wie robotergestützte Systeme zur 3D-Geodatenerfassung, dem Einsatz der Künstlichen Intelligenz zum Nachweis von Notabflusswegen und dem Einsatz von Drohnentechnik liegt der Fokus des Forschungsvorhabens "FloReST" auch in der Risikokommunikation mit der Bevölkerung. Dabei soll während der 3-jährigen Projektlaufzeit in enger Abstimmung mit Pilotkommunen, Fachverbänden und betroffenen Bürgern/-innen ein dialogorientierter Weg zum Voranbringen einer wassersensiblen Entwick-

lung der Siedlungsstrukturen in urbanen Räumen eröffnet werden.

#### Weitere Informationen:

Fachbereich Umweltplanung, Universität Trier  
[www.umwelt-campus.de/campus/organisation/fachbereich-umweltplanungumwelttechnik](http://www.umwelt-campus.de/campus/organisation/fachbereich-umweltplanungumwelttechnik)

(aus: Pressemitteilung Hochschule Trier vom 30. Januar 2022)

### Forschungslabor ermöglicht Analyse des Kunststoffabbaus in Gewässern

Plastikabfälle in Meeren und Flüssen stellen ein weltweites Problem dar, nicht zuletzt wegen der langsamen Zersetzung und des dabei möglicherweise entstehenden Mikroplastiks. Doch wie schnell bauen sich eigentlich die unterschiedlichen Kunststoffe im Wasser ab? Welche Abbauprodukte entstehen dabei? Welche Umgebungsparameter beeinflussen das Abbauverhalten? Auf dem Gelände des Campus Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover in Garbsen entsteht zurzeit unter Federführung des IKK – Instituts für Kunststoff- und Kreislauftechnik – eine einzigartige Infrastruktur, die das Ziel hat, genau diese Fragen zu beantworten. Der Projektname SkalAb steht dabei für "Mehrskalige Analyse aquatischer Abbaumechanismen von Polymerwerkstoffen". Der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) fördert den Aufbau des Labors und die technische Ausstattung mit mehr als 2 Mio. €.

Bis zur endgültigen Zersetzung von Plastik im Meer und in Flüssen können viele hundert Jahre vergehen. Die Forscher wissen noch nicht genau, was mit den unterschiedlichen Kunststoffen im Detail passiert. Die Dauer des Abbaus von Kunststoffen sei nicht nur von deren jeweiliger Zusammensetzung abhängig, sondern von zahlreichen weiteren Faktoren wie beispielsweise Licht, Temperatur oder Strömung sowie deren jeweiligem Zusammenspiel.

Aus diesem Grund wollen die Wissenschaftler am IKK die Szenarien, die in Forschungsprojekten zu untersuchen sind, in unterschiedlichen Größenordnungen in sogenannten Mikro- und Mesokosmen nachbilden. Diese spiegeln dann die natürlichen Umgebungsbedingungen aquatischer Ökosysteme wider. So möchte das Forscherteam das Abbauverhalten und die vorherrschenden Abbaumechanismen unterschiedlicher Materialien in Abhängigkeit von der jeweiligen Umgebung, wie Salzgehalt, Sauerstoffverfügbarkeit, Wellenbewegung oder Temperatur, untersuchen. Die Abbauvorgänge werden auf chemischer und morphologischer Ebene detailliert analysiert. Zusätzlich sollen die Abbauprodukte im wässrigen System erfasst werden.

Mithilfe der Analyse-Methoden wird erstmals die Basis für eine umfassende systematische Erforschung der Zusammenhänge zwischen der Abbaukinetik und den Material- und Umgebungsparametern sowie den Abbaumechanismen und den möglicherweise entstehenden Abbauprodukten im Rahmen von aktuellen und zukünftigen Forschungsprojekten des IKK gelegt. Die Ergebnisse dienen u. a. dazu, angepasste bzw. neuartige Polymerwerkstoffe zu entwickeln, die bessere Abbaueigenschaften aufweisen und so die Umwelt entlasten.

#### Weitere Informationen:

Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik,  
 Universität Hannover  
[www.ikk.uni-hannover.de](http://www.ikk.uni-hannover.de)

(aus: Pressemitteilung Universität Hannover vom 10. März 2022)

### Citizen-Science-Projekt zur Stickstoffbelastung von Gewässern

Genau 8.754 Gewässerproben sammelten die 800 Teilnehmerinnen und Teilnehmer eines von den Universitäten Oldenburg und Osnabrück koordinierten Bürgerwissenschaftsprojekts im Zeitraum von September 2019 bis März 2021. An mehr als 540 Standorten in den Landkreisen Osnabrück, Vechta, Emsland und Cloppenburg sowie der Stadt Osnabrück untersuchten die Freiwilligen mit speziellen Teststäbchen Brunnenwasser, Quellenwasser, Fließgewässer, Standgewässer und Regenwasser, um anhand von Farbschattierungen einen Überblick über den Nitratgehalt zu bekommen. Ein großer Teil der beprobten Fließgewässer weist den Ergebnissen zufolge zu hohe Nitratbelastungen auf, berichtete das Projektteam auf einer Veranstaltung in der Katholischen Akademie Stapelfeld in Cloppenburg. Das Wissenschaftlerteam der Universität Osnabrück stufte drei Viertel der beprobten Fließgewässer als hoch oder sehr hoch belastet ein und bestätigte damit Ergebnisse früherer Untersuchungen. Basierend hierauf konnte eine interaktive Online-Karte mit Messstandorten und Messwerten entwickelt werden.

Eine hohe Nitratbelastung ist sowohl für die Gewässerökologie als auch für die menschliche Gesundheit bedenklich. Die Problematik ist durch das hohe Engagement von Bürgerinnen und Bürgern stärker ins Bewusstsein gerückt.

Im Mittelpunkt des von der Stiftung geförderten Projekts stand der Citizen-Science-Ansatz: Die Forschenden haben Bürgerinnen und Bürger an naturwissenschaftlicher Forschung beteiligt. Die Ergebnisse zeigen, dass Freiwillige einen wichtigen Beitrag zur Forschung zum Thema Gewässerschutz leisten können. Der Ansatz, Freiwillige zu beteiligen, hat sich bewährt. Die hohe Zahl von 800 Teilnehmerinnen und Teilnehmern zeigt, dass in der Region ein großes Interesse an Umweltthemen besteht.

Interessierte konnten innerhalb des Projekts nicht nur Messwerte beisteuern, sondern auch weitere Angebote wie beispielsweise Schülerlabore, eine Online-Ausstellung oder eine von der Universität Oldenburg konzipierte Stickstoffbox mit Experimenten nutzen, um Einblicke in das Thema Stickstoffbelastung zu erlangen. Unter den Freiwilligen, die sich im Projekt engagierten, waren auch 200 Schülerinnen und Schüler gemeinsam mit ihren Lehrkräften.

In einer Begleitstudie untersucht die Universität Osnabrück aktuell, inwieweit die Teilnahme an dem Citizen-Science-Projekt Einstellungen und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz verändert.

Ohne dieses großartige Engagement mit derart vielen Teilnehmern hätten weder die Datenmenge erhoben noch das Projekt so erfolgreich durchgeführt werden können. Der Citizen-Science-Ansatz könne eine innovative Rolle in der wissenschaftlichen Forschung spielen und gleichzeitig Bildung vermitteln.

Die Messergebnisse zeigten eine hohe Übereinstimmung mit den Resultaten anderer Messinitiativen wie beispielsweise den Brunnenwassermessungen des Umweltvereins VSR-Gewässerschutz. Die verwendeten Teststäbchen sind zuverlässig genug, um einen Überblick über die Nitratbelastung zu gewinnen und räumliche und zeitliche Entwicklungen zu verfolgen. Um in weiteren Projekten genauere Messungen durchzuführen, wird derzeit eine Messmethode mit einem Farbsensor und Elementen aus dem 3D-Drucker entwickelt.

Anhand der Daten untersuchte das Team, welche Faktoren die Nitratbelastung beeinflussen. Die Messungen der Bürgerinnen und Bürger zeigen, dass schmale Bäche wie der Bornbach in der Nähe von Damme besonders gefährdet sind, da bereits ein geringer Nitratreintrag zu hohen Konzentrationen führt. Stehende Gewässer wie Seen weisen der Auswertung zufolge eine geringere Belastung auf als Fließgewässer – doch auch hier zeigten sich bei einem knappen Viertel der Messstellen hohe oder sehr hohe Nitratbelastungen. Unter den beprobten Brunnen überschritt etwa ein Sechstel den gesetzlichen Grenzwert für Nitrat von 50 mg/l. Insbesondere die Zusammensetzung des Bodenspiels spielt der Analyse zufolge bei der Belastung des Grundwassers eine große Rolle: So traten in Geestgebieten mit sandigen Böden besonders hohe Nitratkonzentrationen auf.

Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer ist in städtischen und landwirtschaftlich genutzten Flächen höher als in Wäldern und naturnahen Flächen. Über die konkreten Ursachen dafür können die Forschenden anhand der Daten jedoch keine Aussagen machen. Bekannt ist, dass Düngemittel aus der Landwirtschaft eine große Quelle von Nitrat in Gewässern sind. Aber auch Industrie, Verkehr und Abwässer tragen zur Belastung bei. Hohe Nitratwerte führen zu einer Überdüngung von Gewässern mit Algenblüten und Sauerstoffmangel und erhöhen die Kosten für die Trinkwassergewinnung und -aufbereitung. In Folgeprojekten will das Forscherteam die Frage nach den Ursachen genauer untersuchen.

Das Projekt wurde durch einen Beirat begleitet, in dem unter anderem der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie der Kreislandvolkverband Cloppenburg vertreten waren.

#### Weitere Informationen:

Institut für Chemie, Universität Oldenburg  
[www.uol.de/chemie/chemiedidaktik](http://www.uol.de/chemie/chemiedidaktik)

Portal "Citizen Science – Nitrat Monitoring",  
 Universität Oldenburg  
[www.nitrat.uos.de](http://www.nitrat.uos.de)

(aus: Pressemitteilung Universität Oldenburg vom 23. März 2022)

### Fließgewässer an Ackerflächen senken Schadstoffe im Wasserkreislauf

Wassergräben und kleine Bäche am Rand von landwirtschaftlichen Flächen tragen erheblich dazu bei, die aus der Landwirtschaft stammenden Schadstoffe im Wasser zu verringern. Sie fördern vor allem den Nitrat-Abbau durch Mikroorganismen und

haben so einen wichtigen Einfluss auf den Stickstoffgehalt in Flüssen und Seen. Dies hat ein Forschungsteam an der Universität Bayreuth jetzt erstmals nachgewiesen. Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass das Bachwasser in einem intensiven Austausch mit dem umgebenden Grundwasser steht, wodurch die Mikroben stimuliert werden.

Die Studie bietet wichtige Anknüpfungspunkte für eine nachhaltigere Gestaltung von Agrarlandschaften: Die Randgebiete landwirtschaftlich genutzter Flächen mit ihren charakteristischen Wassergräben können möglicherweise gezielt so gestaltet werden, dass Schadstoffbelastungen aus der Landwirtschaft effizienter eliminiert werden. Fließgewässer und auch das Grund- und Trinkwasser werden dadurch besser geschützt.

Die häufig vom Menschen neu geschaffenen oder umgestalteten Wassergräben und Bäche am Rand von Äckern sammeln bis zu 70 % des Wassers in landwirtschaftlichen Einzugsgebieten. Der Anteil, den diese Bäche an der Reinigung des Wassers haben, ist von der Forschung bisher deutlich unterschätzt worden. Man hat diese kleinen Fließgewässer bislang hauptsächlich als reine Drainagen angesehen, die das aus landwirtschaftlichen Nutzflächen stammende Wasser auffangen und abfließen lassen, ohne die Wasserqualität nennenswert zu beeinflussen. Die Bayreuther-Studie widerlegt nun diese Sichtweise. Es konnte gezeigt werden, dass das Bachbett dieser Gewässer dicht mit Mikroorganismen besiedelt ist, die Nitrat abbauen. Diese reduzieren umweltschädliches Nitrat zu gasförmigem Stickstoff. Überraschenderweise haben wir dabei lokal grundlegende Unterschiede in der Besiedlung gefunden: In einigen Abschnitten des Bachbetts fanden sich klassische Denitrifizierer, in anderen Abschnitten dagegen noch weniger bekannte, sogenannte chemolithoautotrophe Nitrat-reduzierer.

Die Besiedlung der Wassergräben mit Organismen, die schädliches Nitrat abbauen, steht in engem Zusammenhang mit einem weiteren Phänomen, das die Forscher jetzt in interdisziplinärer Zusammenarbeit aufzeigen konnten: Die kleinen Fließgewässer nehmen nicht nur Wasser aus der Landschaft auf, sondern geben gleichzeitig auch wieder Wasser an das umgebende Grundwasser ab. Umgekehrt kann dieses Grundwasser stromabwärts auch wieder dem Bach zufließen. Dadurch können auf einer Fließstrecke von wenigen 100 m mehr als 80 % des im Graben fließenden Wassers ausgetauscht werden. Alle diese Prozesse sind abhängig von den lokalen Geländeeigenschaften und beeinflussen ihrerseits die Besiedlung des Bachbetts durch nitratreduzierende Mikroorganismen.

Wir sind hier auf ein bisher unbekanntes Ineinandergreifen von Hydrologie und Mikrobiologie gestoßen, dem die ökologische Landschaftsgestaltung künftig mehr Aufmerksamkeit schenken sollte. Der sehr viel bessere Erkenntnisstand zu größeren Fließgewässern darf nicht zu einer nachrangigen Betrachtung solcher kleiner, landwirtschaftlich geprägter Bäche und Gräben führen. Diese haben einen nicht zu unterschätzenden Anteil an den Selbstreinigungskräften eines gesamten Wassereinzugsgebietes.

Die Forschungsarbeiten wurden exemplarisch in Schwaben, bei Tübingen, durchgeführt. Sie waren eingebettet in den DFG-Sonderforschungsbereich CAMPOS der Universität Tübingen. Sie wurden ebenso begleitet und gefördert durch das Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) der Uni-

versität Bayreuth. Darüber hinaus waren Forscher des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung UFZ in Leipzig, des Helmholtz-Zentrums München – Deutsches Zentrum für Gesundheit und Umwelt in Neuherberg sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) an der Studie beteiligt.

#### Fachartikel:

Wang, Z., Jimenez-Fernandez, O., Osenbrück, K., Schwientek, M., Schloter, M., Fleckenstein, J.H., Lueders, T. (2022): Streambed microbial communities in the transition zone between groundwater and a first-order stream as impacted by bidirectional water exchange. *Water Research*, Vol. 2017, June 2022.  
DOI: 10.1016/j.watres.2022.118334

#### Weitere Informationen:

Lehrstuhl für Ökologische Mikrobiologie, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER)  
[www.bayceer.uni-bayreuth.de/mik](http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mik)

(aus: Pressemitteilung Universität Bayreuth vom 6. April 2022)

## Mecklenburg-Vorpommern

### Update für länderübergreifendes Hochwasserwarnportal

Die Hochwasserkatastrophe vom Juli 2021 hat verdeutlicht, in welcher kurzen Zeit ein extremer Niederschlag zu einem zerstörerischen Hochwasser führen kann und wie wichtig die Gefahrenkommunikation ist. Für Hochwasserwarnungen ist das länderübergreifende Hochwasserportal ein wesentlicher Baustein des Hochwasserrisikomanagements. Das bereits seit 15 Jahren im Auftrag der Umweltministerien und zuständigen Senatsverwaltungen bestehende Portal ermöglicht einerseits eine länderübergreifende Übersicht über die aktuelle Hochwassersituation und ist andererseits ein zentrales Zugangsportale auf amtliche Hochwasserinformationen der einzelnen Bundesländer. Zusätzlich zu Pegelmessdaten und Hochwasserberichten wurde das Informationsspektrum des länderübergreifenden Hochwasserportals (LHP) deshalb jetzt um eine Hochwasserwarnkarte erweitert, auf der auf einen Blick erkennbar ist, in welchen Regionen bzw. Flussabschnitten eine akute Hochwassergefahr besteht.

Die Weiterentwicklung des LHP erfolgt gemeinsam durch die Hochwasserzentralen aller Bundesländer in Zusammenarbeit mit verschiedenen Bundesbehörden. Für das Jahr 2022 ist eine Anknüpfung der neuen regionalen Hochwasserwarnungen des LHPs an die Warn-Apps NINA (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe), KATWARN (Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme) und Warnwetter (Deutscher Wetterdienst) geplant.

Im Jahr 2014 wurde das Internetportal um die App "Meine Pegel" ergänzt. Diese App ermöglicht dem Nutzer einen raschen Überblick über die aktuelle Hochwasserlage, aktuelle Hochwasserwarnungen und die jeweils zuständigen Hochwasserzentralen in Deutschland. Sie liefert detaillierte Informationen für über rund 3.000 Pegel wie Messwerte und für viele Pegel auch Vorhersagen. Zusätzlich bietet "Meine Pegel" die Möglichkeit, sich für frei wählbare Pegel und Warngebiete aktiv benachrichtigen zu lassen (Pushnachricht). Bei Überschreitung eines vom Nutzer

selbst festgelegten Wasserstandes am Pegel oder beim Vorliegen von aktuellen Hochwasserinformationen für ein Bundesland oder ein Warngebiet erhält der Nutzer unmittelbar eine Benachrichtigung.

Die LHP-App "Meine Pegel" ist für Android und iOS in den entsprechenden Stores kostenlos verfügbar. Die neue Version 2.0 wurde hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit grundlegend verbessert und bietet für den Nutzer nun zahlreiche individuelle Konfigurationsmöglichkeiten. Außerdem wurde die regionale Warnkarte neben weiteren Kartenansichten, wie z. B. Karten des Deutschen Wetterdienstes, in die App integriert. Die Karten sind nun frei zoombar und erlauben die interaktive Auswahl einzelner Pegel oder Warngebiete, um für diese mehr Informationen zu erhalten.

Datenbereitstellende für das LHP sind die für Hochwasser zuständigen Dienststellen der Bundesländer, die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie Hochwasserzentralen in benachbarten Staaten. Die Daten werden über eine ausfallsichere LHP-Datenbank nahezu in Echtzeit für den Nutzer bereitgestellt.

#### Weitere Informationen:

Länderübergreifendes Hochwasserportal  
[www.hochwasserzentralen.de](http://www.hochwasserzentralen.de)

(aus: Pressemitteilung Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern vom 4. März 2022)

## Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)

### Veröffentlichung des dritten Bewirtschaftungsplans Rhein – Guter Überblick über den Zustand der Gewässer und den Handlungsbedarf

Zum dritten Mal seit dem Jahr 2009 hat die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) einen Bewirtschaftungsplan für die internationale Flussgebietseinheit Rhein veröffentlicht. Der Plan gibt einen Überblick über den Zustand des Rheins und seiner größten Nebenflüsse sowie des dazugehörigen Grundwassers und fasst zusammen, welche Maßnahmen die Staaten im Zeitraum 2022 bis 2027 ergreifen werden, um den guten Zustand der Gewässer zu erreichen. Im Vergleich zum Zeitraum 2016 bis 2021 zeigt sich eine leichte Verbesserung. Es sind weiterhin erhebliche Anstrengungen nötig, um weitere Fortschritte zu erzielen.

Gemäß der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRRL, Richtlinie 2000/60/EG) erstellen die Staaten im Rheineinzugsgebiet gemeinsam alle 6 Jahre einen Bewirtschaftungsplan für die internationale Flussgebietseinheit Rhein, die den Rhein und alle Nebenflüsse mit einem Einzugsgebiet von über 2.500 km<sup>2</sup> umfasst. Auch die Nicht-EU-Staaten Schweiz und Liechtenstein haben sich an der Erarbeitung beteiligt.

Der Bewirtschaftungsplan 2022 bis 2027 wurde – nach einer sechsmonatigen Öffentlichkeitsbeteiligung von April bis Oktober 2021 – am 22. März 2022 veröffentlicht.

Bis spätestens zum Jahr 2027 sollte – im Einklang mit der EG-WRRRL – für alle Gewässer der gute Zustand erreicht sein. Dazu werden der Rhein und seine Nebenflüsse in Abschnitte, die sogenannten Oberflächenwasserkörper, unterteilt und für diese wird eine Bewertung vorgenommen. Die neuesten Ergebnisse zeigen, dass sich in der internationalen Flussgebietseinheit Rhein derzeit 10 % der größeren Gewässer in einem guten ökologischen Zustand befinden. Dies ist eine Verbesserung um 7 % gegenüber dem Jahr 2016.

Der ökologische Zustand wird vorrangig durch verschiedene Bio-Indikatoren bestimmt. Verbesserungen gab es beispielsweise bei der Fischfauna im Mittelrhein sowie bei den wirbellosen Kleinstlebewesen im Niederrhein, dem so genannten Makrozoobenthos. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass bei der Gesamtbewertung des Zustands das sogenannte "One-out-all-out-Prinzip" der EG-Wasserrahmenrichtlinie zum Tragen kommt. Der Zustand wird vom jeweils schlechtesten Indikator bestimmt. Verbesserungen, die bei einzelnen biologischen Qualitätskomponenten festzustellen sind, spiegeln sich daher in der Gesamtbewertung nicht wider. Daher werden die Bio-Indikatoren in den Karten im Bewirtschaftungsplan auch einzeln dargestellt.

Für das Jahr 2027 wird prognostiziert, dass ein Drittel der Oberflächenwasserkörper den guten ökologischen Zustand erreichen wird.

Ein besseres Bild zeigt sich beim Zustand des Grundwassers, obwohl das Grundwasser, zum Teil bedingt durch sehr lange Verweilzeiten, träge auf Veränderungen reagiert und es somit länger dauert, bis bereits umgesetzte Maßnahmen ihre positive Wirkung entfalten. Bei der Bewertung des Zustandes wird nach Menge und Qualität des Grundwassers unterschieden.

Bereits heute befinden sich 97 % der Grundwasserkörper in einem guten mengenmäßigen Zustand. Insgesamt 75 % werden hinsichtlich ihrer Qualität als gut eingestuft; dies ist ein Plus von 8 % gegenüber dem Jahr 2016. Bis zum Jahr 2027 soll der Anteil der Grundwasserkörper in einem guten qualitativen chemischen Zustand auf knapp 80 % ansteigen.

Es wurden in den letzten 6 Jahren von den Staaten im Rheineinzugsgebiet zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung des Zustands der Gewässer ergriffen. Beispiele hierfür sind die Eröffnung mehrerer großer Fischpässe, die Teilöffnung der Schleusen im Haringvlietdamm im Jahr 2018, die Renaturierung von Flüssen und Bächen im Einzugsgebiet, die Wiederherstellung von Flussaunen sowie die Reduktion von Wasserverschmutzungen.

Die Gewässer sind seit Jahrhunderten vom Menschen verändert und belastet worden. Daher sind weitere Maßnahmen erforderlich, die im Bewirtschaftungsplan der IKSR erläutert werden und im Detail den nationalen Bewirtschaftungsplänen entnommen werden können.

#### **Hintergrundinformation zur IKSR**

In der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) arbeiten seit mehr als 70 Jahren die Schweiz, Frankreich, Deutschland, die Niederlande, Luxemburg und die Europäische Union auf der Basis eines völkerrechtlichen Übereinkommens zusammen, um die vielfältigen Nutzungen und den Schutz des Gewässers in Einklang zu bringen. Für die Umsetzung europäischer Richtlinien wurde die grenzüberschreitende Kooperation auf die Staaten Österreich, Liechtenstein, Italien und die belgische Region Wallonien ausgeweitet.

Aktuelle Präsidentin ist Veronica Manfredi von der Europäischen Kommission. Ihr und den Gremien der IKSR steht ein international besetztes Sekretariat mit Sitz in Koblenz zur Seite.

#### **Weitere Informationen:**

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

*(aus: Pressemitteilung Internationale Kommission zum Schutz des Rheins vom 22. März 2022)*

## Personen

### IOW-Forscherin Maren Voß als erste Trägerin des Björn-Carlson-Ostsee-Preises

Der im Jahr 2022 erstmalig verliehene Björn-Carlson-Ostsee-Preis der schwedischen Björn Carlson Baltic Sea Foundation geht an Prof. Dr. Maren Voß vom Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW). Ausgezeichnet wird Maren Voß für ihre wegweisende Forschung zur Bedeutung von Stickstoff in marinen Kreisläufen und insbesondere seiner Rolle bei der Überdüngung der Ostsee. Mit innovativen Methoden erfasste sie die unterschiedlichen Eintragsquellen und Umsetzungsprozesse dieses Nährstoffs und trug so dazu bei, dass bei der Bekämpfung der Ostsee-Überdüngung der Fokus verstärkt auf Stickstoff gelegt wurde. Der mit 3 Mio. Schwedischen Kronen dotierte Preis wurde am 3. Juni 2022 in Stockholm verliehen.

Überdüngung (Eutrophierung) gehört zu den größten Umweltproblemen der Ostsee. Sie entsteht durch einen Überschuss an Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, und wird durch menschliche Aktivitäten verursacht, wie den Einsatz von Düngern in der Landwirtschaft oder die Einleitung von ungeklärten Abwässern. Dieser Nährstoffüberschuss führt zu massiven Algenblüten, die das Ökosystem stark beeinträchtigen, wenn bei ihrer Zersetzung dem Wasser Sauerstoff entzogen wird.

Die diesjährige Björn-Carlson-Ostsee-Preisträgerin Maren Voß beschäftigt sich seit über 25 Jahren mit dem Stickstoffkreislauf der Ostsee und hat fast 70 Studien zu diesem Thema veröffentlicht. Sie kam im Jahr 1992 von der Universität Kiel nach Warnemünde an das im selben Jahr neu gegründete Institut für Ostseeforschung. Dort trug sie maßgeblich dazu bei, dass der Bereich "Biologische Meereskunde" durch die Einrichtung von Speziallaboren und die Etablierung innovativer Analytik deutlich ausgebaut wurde. Im Ostseeraum war Prof. Maren Voß die Erste, die die Analyse stabiler Isotope in Wasser und organischen Stoffen anwandte, um die Prozesse innerhalb der Nährstoff-Kreisläufe zu entschlüsseln. Die Messung mikrobieller Stoffwechselraten und deren Extrapolation zur Erstellung von Budgets sowie wichtige Methodenentwicklungen (z. B. Messung der Stickstofffixierung) sind zentrale Elemente ihrer Arbeit. Für die Ostsee hat sie zum

ersten Mal beschrieben, dass die Eutrophierung durch Flüsse ein klar nachweisbares Signal in den Organismen und Sedimenten hinterlässt. Sie zeigte, dass neben den Flüssen auch Niederschläge und stickstofffixierende Mikroorganismen wichtige Nährstoffquellen für die Ostsee sind.

Wegen dieser Arbeiten wurde Prof. Voß von der schwedischen Umweltschutzbehörde als eine von fünf Sachverständigen berufen, um ihre Expertise in den Bericht über die "Eutrophierung der Gewässer an Schwedens Westküste" einzubringen, der erstmals die wesentliche Rolle von Stickstoff bei der Eutrophierung dieses Seegebietes hervorhob und damit die bisherige Fokussierung auf Phosphor änderte. Zudem wirkte Prof. Maren Voß an einer Stellungnahme zur Verringerung externer Stickstoff- und Phosphoreinträge mit, die darauf abzielte, den Teufelskreis interner Rückkopplung zu durchbrechen, durch den das Management der Eutrophierung der Ostsee permanent zurückgeworfen wird. Ihr Fachwissen brachte sie auch in die "Europäische Stickstoffbewertung" ein, in der die problematische Verschmutzung durch Stickstoffverbindungen in der Umwelt und die Notwendigkeit ihrer Regulierung sowohl im Ostseeraum als auch für ganz Europa hervorgehoben wurde.

Die Björn Carlson Baltic Sea Foundation ist eine private Stiftung, die im Jahr 2005 von Björn Carlson (1935 bis 2021) gegründet wurde. Ihr Ziel ist, Maßnahmen zur Verbesserung der Ostsee-Umwelt zu fördern. Zunächst vergab die Stiftung Zuschüsse für Forschungs- und Anwendungsprojekte. Im Jahr 2021 richtete sie ihren Fokus neu aus und stiftete den jährlichen Björn Carlson Baltic Sea Prize, der im Jahr 2022 erstmalig verliehen wird. Er würdigt Forschung und Initiativen, die einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung der Umwelt in der Ostsee leisten. Der Nominierungsausschuss der Stiftung hatte drei Personen vorgeschlagen, aus denen der Stiftungsrat Maren Voss als Preisträgerin auswählte. Die Verleihung durch die schwedische Kronprinzessin Victoria fand am 3. Juni 2022 im Stockholmer Baltic Sea Science Center statt.

*(aus: Pressemitteilung Leibniz-Institut für Ostseeforschung vom 20. April 2022)*

## Projektbericht

# Die Bedeutung mechanischer Schwimmerschreibpegel des Bremer Uhrmachers C. B. Kappert für die Unterweserkorrektion durch Ludwig Franzius

Für Bremen war die Schifffahrt schon immer von existentieller Bedeutung. Daher galt es zu verhindern, dass die Stadt aufgrund schlechter Fahrwasserverhältnisse ihre Funktion als Seehandelsplatz verlor. Dies gelang erst Ludwig Franzius Ende des 19. Jahrhunderts mit seinem Projekt der Weserkorrektion. An kritischen Stimmen mangelte es seinerzeit nicht, aber letztendlich war das Projekt überaus erfolgreich. Nun konnten auch große Seeschiffe den ebenfalls von Franzius konzipierten Freihafen erreichen. Wenig bekannt ist, wie wichtig für Franzius' Berechnungen Schreibpegel waren, die zu dieser Zeit noch keine große Verbreitung hatten. Ein Bremer Uhrmacher, Clemens Bernhard Kappert, sorgte dafür, dass zwischen Bremen und Bremerhaven sieben Pegel die Wasserstände der Weser kontinuierlich aufzeichneten. Diese Daten waren für das Studium der Hydrologie der Weser und damit für das Gelingen des gesamten Korrektionsprojektes von zentraler Bedeutung.

### 1 Die Weser als Schifffahrtsstraße und das Projekt der Unterweserkorrektion

Für den Handel der Stadt Bremen war die Schifffahrt von jeher von allergrößter Bedeutung. Zunächst diente ein Seitenarm der Weser, die Balge, als Hafen, bevor im Spätmittelalter die Schlachte, das befestigte Weserufer, zu einem wichtigen Warenumschlagsplatz wurde. Durch zwei gegenläufige Entwicklungen wurde die Bedeutung Bremens als Seehandelsplatz jedoch zunehmend gefährdet. Der Tiefgang der Schiffe nahm stetig zu, und gleichzeitig versandete die Weser immer mehr, sodass die Seeschiffe ihre Waren nicht mehr direkt nach Bremen transportieren konnten. Daher musste ihre Ladung in Unterweserhäfen wie Brake oder Elsfleth auf sogenannte Weserkähne – Plattbodenschiffe mit geringem Tiefgang – umgeladen werden.

Von diesem Missstand lebte der Berufszweig der Kahnschiffer, für die Kaufleute war das Leichtern aber mit Zeitverlusten und zusätzlichen Kosten verbunden. Bei Flauten oder ungünstigen Wasserständen konnte sich die Fahrzeit der Weserkähne erheblich verlängern, insbesondere in der "Langen Bucht", einer Weserschleife im Bereich der heutigen Industrieböden, konnten sie oft tagelang aufgehalten werden. Zu Beginn des 17. Jahrhunderts wurde weserabwärts deshalb ein neuer Hafen unter der Expertise holländischer Wasserbauer angelegt. Der Vegesacker Hafen war das erste künstlich angelegte Hafenbecken Deutschlands. Er wurde im Jahr 1622 fertiggestellt und begeht in diesem Jahr somit seinen vierhundertsten Geburtstag. Zum Ende des 17. Jahrhunderts war die Versandung der Weser so weit fortgeschritten, dass auch der Vegesacker Hafen seine Funktion als Handelshafen einbüßte. Die Rolle Bremens als Seehandelsplatz war abermals in Gefahr, da Seeschiffe nur noch die oldenburgischen Häfen Brake und Elsfleth erreichen konnten.

Unter Bürgermeister Johann Smidt wurde ein weiterer Hafen nahe der Wesermündung angelegt. Dieser "Bremer Hafen"

wurde im Jahr 1830 fertiggestellt und war die Keimzelle der heutigen Stadt Bremerhaven. Den Status als Seehandelsplatz konnte Bremen sich damit zwar erhalten, für die Kaufleute, deren Kontore etwa 65 Kilometer vom Hafen entfernt in Bremen lagen, war die Situation dennoch unbefriedigend.

Ludwig Franzius, seit dem Jahr 1875 Oberbaudirektor in Bremen, hatte zwischen 1878 und 1881 ein "Projekt zur Korrektion der Unterweser" ausgearbeitet, das diese Situation verbessern sollte (FRANZIUS, 1882a). Durch Kupierungen von Nebenarmen, durch Aufhebungen von Stromspaltungen, Begradigungen von Krümmungen und einen Ausbau vor allem des Niedrigwasserprofils sollte die Stromkraft so gesteigert werden, dass der Fluss eine Selbstreinigungskraft entwickelt, die den Versandungen entgegenwirkt.

Zunächst wurde zwischen den Jahren 1883 und 1885 die Lange Bucht durchstochen. Da diese Schleife vollständig auf Bremer Gebiet lag, war keine Zustimmung der Nachbarstaaten erforderlich. Dieser erste Schritt der Weserkorrektion bewirkte bereits eine erste Erleichterung für die Schifffahrt. Trotzdem konnten nur Schiffe bis zu einem Tiefgang von 3 Metern die Stadt erreichen, während das damalige Regelfrachtschiff einen Tiefgang von 5 Metern aufwies. Hinzu kam, dass Bremen durch Reichskanzler Bismarck gedrängt wurde, sich dem Zollverein anzuschließen. Man sprach Bremen jedoch die Eigenschaft als Seehafen ab, und es kam die für Bremen gefährliche Frage auf, ob neben Bremerhaven auch Bremen einen Freibezirk benötigte. Um überhaupt einen Freibezirk in Bremen-Stadt zugestanden zu bekommen, musste Bremen die feste Absicht bekunden, in diesem Bezirk ein Hafenbecken anzulegen. Es erwies sich nun als Glücksfall, dass Franzius bereits 1882 einen Plan für einen stadtbremischen Hafen entworfen hatte, denn dieser Umstand war für die Erlaubnis des Reichs zur Ausweisung eines Freibezirks ausschlaggebend. Mit dem Bau des Freihafens wurde im Sommer 1885 begonnen, denn bis zum Zollanschluss musste der Hafen fertiggestellt sein. Er wurde als offener Tidehafen ohne Schleuse gebaut, und die Infrastruktur war äußerst innovativ. An den Kaimauern befanden sich bei Inbetriebnahme etwa 70 Halbportalkräne, die mit Druckwasser betrieben wurden. Der gesamte Hafen war mit einer elektrischen Beleuchtung ausgestattet. An den Kaimauern verliefen außerdem Gleise, dahinter befanden sich einstöckige Kaischuppen, die der kurzzeitigen Lagerung und dem Sortieren der Waren dienten. Hinter diesen Schuppen befand sich eine Ladestraße, die mit Pferdefuhrwerken befahren werden konnte, die aber ebenfalls mit Gleisen ausgestattet war. Auf der anderen Seite der Ladestraße wurden mehrstöckige Speicher zur längerfristigen Lagerung errichtet. Dieses damals moderne Konzept wurde als das "Bremer System" bekannt. Der Hafen wurde rechtzeitig zum Zollanschluss im Oktober 1888 fertiggestellt.

Mit dem Ausbau der Weser konnte erst im Juli 1887 begonnen werden. Das volle Arbeitspensum wurde sogar erst zwei Jahre

später erreicht, als alle notwendigen Gerätschaften, Eimerkettenbagger, Klappschuten usw. angeschafft waren. Bei seiner Einweihung war der Freihafen deshalb zwar tief genug für Schiffe mit 5 Metern Tiefgang, konnte jedoch nur von Schiffen mit einem Tiefgang von höchstens 3 Metern angelaufen werden. Eine finanzielle Unterstützung durch das Reich für die 30 Mill. Mark teure Weserkorrektur wurde Bremen versagt, und auch Preußen und Oldenburg beteiligten sich nicht daran. Im April 1886 wurde ein Reichsgesetz erlassen, das Bremen die Erhebung einer Schifffahrtsabgabe zur Finanzierung des Vorhabens gestattete, sofern es gelingen würde, die Weser für Schiffe mit einem Tiefgang von 5 Metern passierbar zu machen. Im Oktober 1893 war dieses Ziel erreicht, und ab April 1894 wurde Bremen die Erhebung der Schifffahrtsabgabe gestattet. Von Unterhaltungsarbeiten abgesehen war diese erste Korrektur der Unterweser 1895 weitgehend abgeschlossen.

Ludwig Franzius hatte mit diesem Projekt Pionierarbeit geleistet. Zuvor waren zwar Korrekturen im Tidegebiet der Flüsse Clyde in Schottland und Tyne in England durchgeführt worden, die Ausbaustrecken waren hier mit 30 bzw. 18 Kilometern jedoch bedeutend kürzer, außerdem führten beide weniger Oberwasser ab als die Weser. In beiden Fällen wurde das Ausbauziel zudem auf rein empirischem Weg erreicht. Im Gegensatz dazu basierte das Projekt zur Korrektur der Unterweser vollständig auf einer im Vorfeld der Bauarbeiten ausgearbeiteten theoretischen Grundlage. Für eine ausführlichere Darstellung der Weserkorrektur sei auf FLÜGEL (1988) verwiesen.

## 2 Ein wenig bekannter Schreibpegeltyp: Das "System Berg – Kappert"

Eine technische Kommission des Reichs zur Ausarbeitung eines Korrektionsplans der Weser bestand seit dem Jahr 1874. Als Ludwig Franzius im Januar 1878 dieser Kommission beitrug, waren zahlreiche Querprofile aufgenommen und Karten erstellt worden. Ein Ausbauplan existierte jedoch noch nicht. Die vorhandenen Daten reichten zu diesem Zweck nicht aus, Franzius fehlten für sein Studium der Hydrologie der Weser vor allem Aufzeichnungen über die Flutwelle. Verbreitet waren zu dieser Zeit einfache Lattenpegel, an denen durch Pegelbeobachter zweimal täglich bei Hoch- und bei Niedrigwasser die Wasserstände abgelesen wurden.

Schreibpegel, die kontinuierliche Aufzeichnungen lieferten, waren zu dieser Zeit noch ein Novum. Der erste Schreibpegel an der Weser war im Jahr 1866 an der Großen Weserbrücke installiert worden (Abb. 1). Vor der Einführung eines einheitlichen Höhenbezugssystems war dieser Bremer Hauptpegel der Bezugspunkt für alle Höhenangaben in der Stadt. Der Entwurf für den Schreibpegel stammte von Friedrich Rudolph Theodor Berg, der von 1860 bis 1873 Wasserbaudirektor in Bremen war. Seiner Darstellung zufolge setzte der Uhrmacher Christian Weber seinen Entwurf um (BERG, 1870). Spätere Quellen deuten darauf hin, dass dessen Angestellter Kappert derjenige war, der den ersten Schreibpegel der Weser fertigte (TOLLE, 1880; VERHANDLUNGEN, 1898).

Clemens Bernhard Kappert wurde am 27. Juli 1831 in Münster geboren (Kirchenbuch Nr. 6 (Taufbuch), Liebfrauen, Münster, 1830 – 1836, Seite 36, Nr. 134) und arbeitete seit dem Jahr 1850 bei Weber in der Westerstraße 56. Nach dessen Tod im Jahr 1870



**Abbildung 1**

Die Große Weserbrücke um das Jahr 1885. Oberhalb der rechten Pegelmarkierungen steht das Gehäuse des Schreibpegels (Staatsarchiv Bremen, StAB 10.B Kartei 443, Ausschnitt).

übernahm Kappert Webers Betrieb (StAB 2-P.8.A.6.a.5.Bd.206 (1870/58); Abb. 2).

Der Bremer Hauptpegel war bereits im Jahr 1855 mit einer Pegeluhr ausgestattet worden, die den Wasserstand auf einem Zifferblatt in Fuß und Zoll anzeigte. Der im Jahr 1866 ergänzte Schreibmechanismus wurde in einem Kasten an der Gehäuserückseite untergebracht (BERG, 1870). Damit gehörte der Bremer Schreibpegel zu den ersten Apparaten seiner Art in deutschen Gewässern, denn frühere Schreibpegel existierten nur in der Elbe bei St. Pauli seit Oktober 1863 (STEHR, 1964) sowie seit Dezember 1862 bei Friedrichstadt, wobei über letzteren keine weiteren Einzelheiten überliefert sind (ROHDE, 1975). Ähnlich wie später die Instrumente der Herren Professor Wilhelm Seibt und Rudolf Fuess waren die Bremer Pegel aus der Zusammenarbeit eines Fachmannes für Hydrologie sowie eines Feinmechanikers hervorgegangen. In Analogie zu den weitaus bekannteren Apparaten aus der Berliner Werkstatt könnte man die an der Unterweser zum Einsatz gekommenen Pegel dem "System Berg – Kappert" zuordnen. Clemens Bernhard Kappert lieferte im Jahr 1876 auch den zweiten Schreibpegel an der Weser, der an der Einfahrt zum Vegesacker Hafen aufgestellt wurde. Um sein Projekt auf eine solide Planungsgrundlage stellen zu können, benötigte Ludwig Franzius weitere Schreibpegel. Daher wurden vor Ausführung

**C. B. Kappert**  
(C. Weber Nachfolger)  
**Uhrmacher**  
u n d  
**Nähmaschinen-Fabrik.**  
Westerstrasse 56.

**Abbildung 2**

Anzeige von C. B. Kappert nach der Geschäftsübernahme (Adreßbuch Bremen, 1872).

der Korrektur fünf zusätzliche Instrumente dieser Art zwischen Bremen und Bremerhaven aufgestellt, die ebenfalls von Kappert gefertigt wurden (VERHANDLUNGEN, 1878). Später lieferte Clemens Bernhard Kappert auch wenige Schreibpegel, die nicht an der Unterweser zum Einsatz kamen. Ein Pegel aus seiner Fertigung wurde 1886 in Bunthaus an der Elbe errichtet, und im Jahr 1888 lieferte er sogar ein Instrument für Koblenz. Kapperts letzter Schreibpegel wurde im Dezember 1895 in Cuxhaven aufgestellt. Während der Pegel in Bunthaus stets zufriedenstellende Ergebnisse lieferte, funktionierte das Cuxhavener Pendant ungenau. Eine Rolle kann dabei der abweichende Aufzeichnungsmaßstab gespielt haben. Während in Bunthaus der Wasserstand im Maßstab 1 : 10 bei einem Papiervorschub von 3,25 mm/h aufgezeichnet wurde, war für Cuxhaven ein Maßstab von 1 : 20 für die Wasserstände und ein Vorschub von 17,5 mm/h gewählt worden (NLA ST Rep. 99 Nr. 10, 27. und 31. August 1896), sodass die Flutkurven sehr viel flacher aufgezeichnet wurden. Noch vor der Aufstellung des Pegels in Cuxhaven hatte der Direktor des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts in Potsdam, Professor Helmert, geurteilt, dass die Kappert'schen Pegel aufgrund mangelnder Genauigkeit wohl für technische Zwecke, nicht jedoch für wissenschaftliche Wasserstandsbeobachtungen geeignet seien, weshalb er die Aufstellung eines Pegels nach dem System Seibt-Fuess empfahl (NLA ST Rep. 99 Nr. 10, 15. Oktober 1895). Kappert selbst konnte die Probleme mit dem Cuxhavener Pegel nicht mehr beheben, er verstarb, kurz nachdem der Pegel aufgestellt worden war, am 13. Januar 1896 (NLA ST Rep. 99 Nr. 10, 8. Juni 1896; StAB 4.60/5 Br.-Mitte Reg.-Nr. 90/1896).

### 3 Die Bedeutung der Schwimmerschreibpegel für Ludwig Franzius

Die enorme Bedeutung der mithilfe der Schreibpegel gewonnenen Daten deutete Ludwig Franzius in seiner Projektbeschreibung bereits an: "Als Grundlage aller in dem vorliegenden Projekte gemachten Angaben über Fluterscheinungen und der daraus gezogenen Folgerungen dienen die von den 7 selbstregistrierenden Pegeln in der Zeit vom 27. Jan. 1879 bis 27. Januar 1880, also für 1 Jahr gezeichneten Flutkurven." (FRANZIUS, 1882a). An anderer Stelle schrieb er: "Durch Verbindung der Wassermengen und zugehörigen Querschnitte jedes Orts und Augenblicks liessen sich endlich auch die betreffenden Geschwindigkeiten ermitteln und somit sämtliche thatsächlich in dem uncorrigierten Strome stattfindenden Verhältnisse erkennen." (FRANZIUS, 1882b).

Zur Wartung der Schreibpegel machte Ludwig Franzius genaue Vorgaben. Der Wechsel der Papierbögen auf der Registrierwalze sollte jeden Montagmittag um 12 Uhr durch die Pegelwärter erfolgen. Ferner betonte Franzius, dass die Wärter zwar die Uhrwerke aufziehen sollten, es ihnen jedoch nicht erlaubt war, Veränderungen an den eingestellten Uhrzeiten vorzunehmen. Franzius schilderte, dass eine Übereinstimmung der Zeiten aller sieben Schreibpegel von höchster Wichtigkeit war. Abweichun-

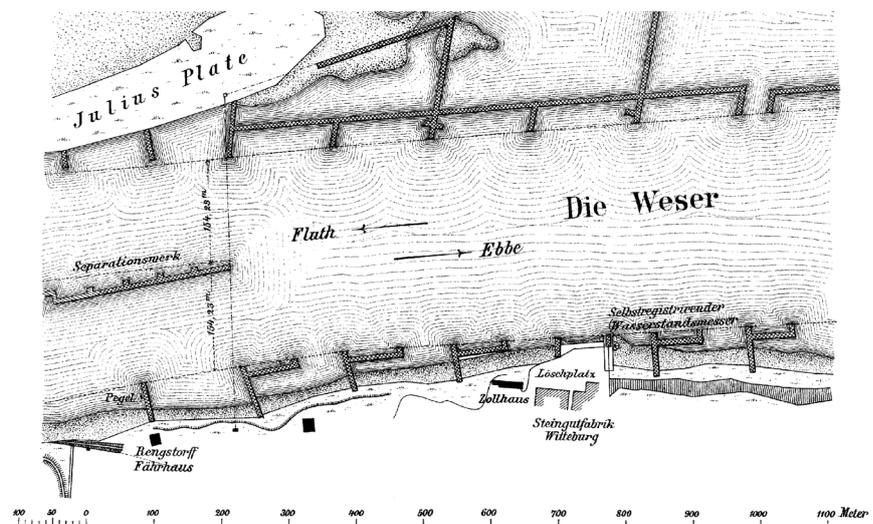
gen zur Ortszeit hätte man leicht korrigieren können, die Pegel untereinander durften jedoch keine Zeitdifferenz aufweisen. Franzius beauftragte daher den Uhrmacher Clemens Bernhard Kappert mit der Revision aller Pegel, die monatlich zu erfolgen hatte. Kappert musste festgestellte Abweichungen und vorgenommene Korrekturen dokumentieren und Franzius über jede Revision berichten. So sollte sichergestellt werden, dass die Zeiten der sieben Pegel stets exakt übereinstimmten (FRANZIUS, 1882a). Die auf diese Weise synchronisierten Schreibpegel verschmolzen somit zu einer zusammenhängenden Messeinheit: "Durch einheitliche Controle der ganzen Apparate, namentlich der Uhren in denselben, bilden diese 7 Pegel einen Gesamt-Apparat für das ganze fragliche Fluthgebiet." (FRANZIUS, 1882b).

George de Thierry, der als Bauinspektor unter Franzius tätig war, betonte posthum nicht nur dessen herausragende Leistung, sondern auch den Anteil, den die Schreibpegeldaten daran hatten: "Das große Verdienst von Franzius liegt in der wissenschaftlichen Begründung seines Projekts. Eine Anzahl, längs dem Flußlauf von Bremen bis Bremerhaven, aufgestellter selbstschreibender Pegel lieferte nebst den vor Franzius' Eintritt in die Kommission vorgenommenen Profilaufnahmen die für die Bearbeitung des Projektes notwendigen grundlegenden Beobachtungen." (DE THIERRY, 1913).

Neben dem Freihafenbau zählt vor allem die Weserkorrektur zu Franzius' Lebenswerk, für das Bremen ihn mit einem Denkmal ehrt. Dass die Schreibpegel von Kappert einen ganz wesentlichen Beitrag zum Erfolg seines Projekts leisteten, scheint dagegen weitgehend in Vergessenheit geraten zu sein.

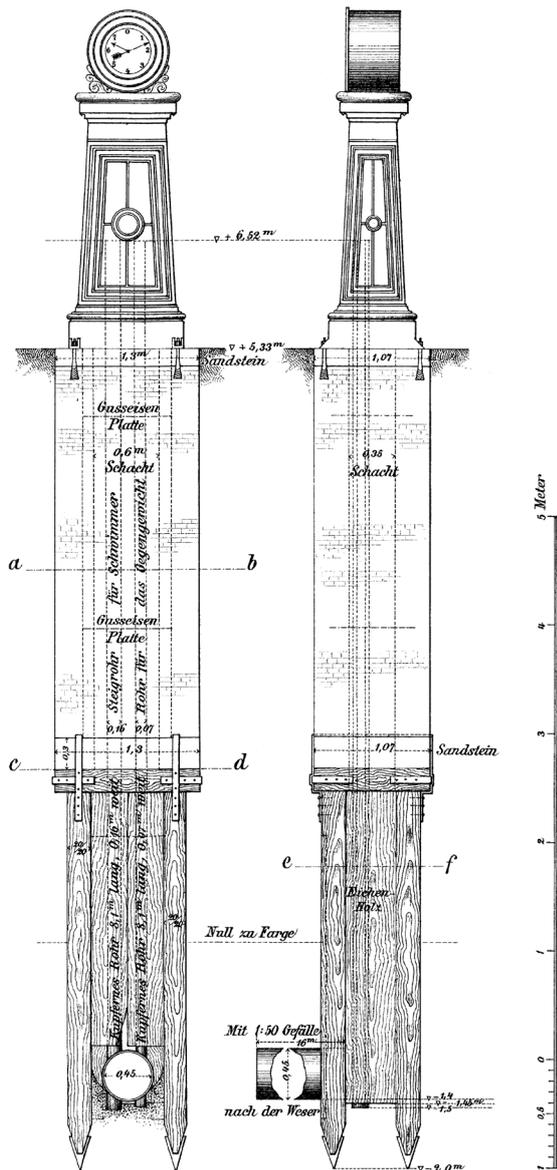
### 4 Der Schwimmerschreibpegel in Farge

Einer der fünf zusätzlich errichteten Schwimmerschreibpegel befand sich nördlich von Bremen im preußischen Farge. Dank einer ausführlichen Beschreibung aus dem Jahr 1880 ist seine Konstruktion gut bekannt (TOLLE, 1880). Der Verfasser des



**Abbildung 3**

Lage des Schwimmerschreibpegels von 1878 am Bollwerk der Steingutfabrik Witteburg in Farge. Am Fährhaus ist der ältere Lattenpegel (Pegel C, Niedrigwasserpegel) verzeichnet (TOLLE, 1880, verändert).

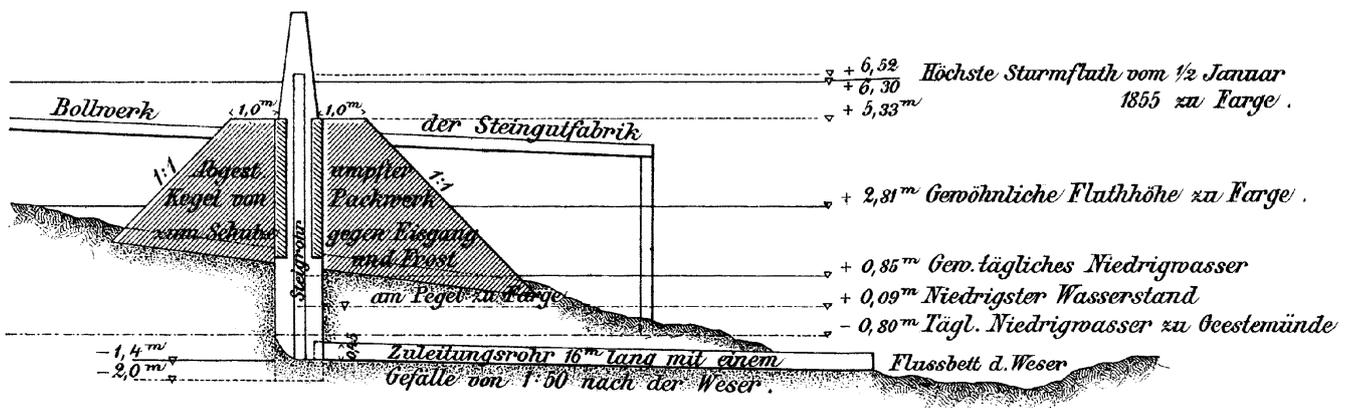


**Abbildung 4**  
Detail des Farger Schreibpegels mit Steigrohr für Schwimmer, Rohr für Gegengewicht, hölzernem und gemauertem Schacht sowie gusseisernem Gehäuse der Pegeluhr (TOLLE, 1880, verändert).

Artikels, Baurat Heinrich Wilhelm Tolle, ist ein Bruder von Adolph Tolle (NLA HA, Hann. 90, Nr. 3081), der u. a. auf Norderney die erste Seebrücke, ein Dünschutzwerk und den Leuchtturm geschaffen hat (Centralblatt der Bauverwaltung, 1890). Von Heinrich Tolle stammen auch die Pläne für die Ritterhuder Schleuse in der Hamme (TOLLE, 1878) sowie für das Schöpfwerk Höftdeich (WIEZOREK, 1997), mit dem das St. Jürgensland zwischen der Hamme und der Wümme bis heute entwässert wird.

Zum Schreibpegel in Farge führt Tolle aus, dass er sich am Bollwerk der Steingutfabrik Witteburg befand (Abb. 3). Aufgrund des hohen Ufers musste an diesem Standort ein tiefer Schacht hergestellt werden, dessen unterer Teil aus Eichenbohlen bestand, wohingegen der obere Teil gemauert war (Abb. 4). Ein "Buschkegel" schützte den Pegelschacht gegen Eisgang und Frost. In dem Schacht befanden sich zwei kupferne Rohre mit einer beachtlichen Länge von 8,1 Metern. Eines der beiden Rohre, das Steigrohr, stand über ein 16 Meter langes Zuleitungsrohr mit der Weser in Verbindung (Abb. 5). In dem Steigrohr bewegte sich ein kupferner Schwimmkörper (Durchmesser 15 cm, Höhe 25 cm) dem Wasserstand entsprechend auf und ab, in dem zweiten Rohr befand sich ein Gegengewicht. Der Schwimmer und sein Gegengewicht waren durch eine Kette miteinander verbunden, die das Steigen bzw. Sinken des Schwimmers auf eine Achse übertrug. Der gemauerte Schacht war mit einer Sandsteinplatte abgedeckt, auf der sich ein gusseisernes Gehäuse mit einem Zifferblatt zur Anzeige des Wasserstandes in Metern und Zentimetern befand. In dem Gehäuse war die von Kappert hergestellte Mechanik untergebracht, die zur Aufzeichnung der Wasserstände diente. Dazu wurde die Bewegung des Schwimmers auf eine Schreibfeder übertragen, die den Wasserstand auf einer senkrecht stehenden Walze im Maßstab 1 : 25 aufzeichnete.

In einer Woche vollzog die Walze eine Rotation, sodass die Papierbögen zur Aufzeichnung wöchentlich gewechselt werden mussten (TOLLE, 1880). Ende des Jahres 1878 war das Instrument in Betrieb, wie eine vom 23. bis 30. Dezember aufgezeichnete Ganglinie belegt (Abb. 6). Der Nullpunkt des Farger Schreibpegels lag bei - 1,238 m ü. NN (KELLER, 1901). Die Pegelinstruktion aus dem Jahr 1871 legte fest, dass die mit Schreibpegeln ermittelten Wasserstände monatlich mit den an einem festen Pegel abgelesenen Werten abgeglichen werden mussten (DEUTSCH, 2010). In Farge nutzte man zu diesem Zweck wahrscheinlich einen etwa 700 Meter weseraufwärts gelegenen Lattenpegel. Dieser war im



**Abbildung 5**  
Querprofil des Wasserstandsmessers mit dem 16 m langen Zuleitungsrohr, dem Steigrohr für den Schwimmer sowie dem Schutzkegel (TOLLE, 1880).



ein neues Zuleitungsrohr beschafft und ein neuer Schacht hergestellt wurde. Am 13. Dezember 1890 ging der Schreibpegel am neuen Standort wieder in Betrieb (StAB 4.33/1 11). Bis zu welchem Zeitpunkt der Pegel von Clemens Bernhard Kappert die Wasserstände der Weser in Farge aufzeichnete, ließ sich mit den bislang erschlossenen Quellen nicht klären. Der Pegel an der Großen Weserbrücke wurde wegen nicht zufriedenstellender Ergebnisse gegen einen Pegel des Systems Seibt-Fuess ausgetauscht (VERHANDLUNGEN, 1898), und weitere Unterweserpegel wurden ebenfalls ersetzt, wobei zum Teil Luftdruckpegel gewählt wurden (VERHANDLUNGEN, 1899). Daher erscheint es wahrscheinlich, dass früher oder später auch der Farger Schreibpegel durch ein anderes System ersetzt wurde.

## 5 Kapperts Schreibpegel am Rhein in Koblenz

Kein einziger der sieben Schreibpegel an der Unterweser blieb erhalten, daher vermitteln nur Tolles Skizzen aus dem Jahr 1880 einen Eindruck ihres Erscheinungsbildes. Zumindest das Gehäuse eines vergleichbaren Instruments blieb aber an anderer Stelle bis heute erhalten – es befindet sich am Pegelhaus in Koblenz. Ein Schriftzug auf dem Gehäuse zeugt davon, dass die ursprünglich darin verbaute Mechanik ebenfalls vom Bremer Uhrmacher Kappert stammte. Der Koblenzer Schreibpegel muss einer der ersten am Rhein gewesen sein. Zuvor war wohl nur in Konstanz seit 1869 ein "selbstaufzeichnender Apparat" (HONSELL, 1889) sowie in Basel seit 1868 ein stündlich aufzeichnender Pegel in Betrieb (KUPFERSCHMID, 1927), hinzu kam 1888 ein "pneumatischer Registrierapparat" in Maxau (HONSELL, 1889).

Wie Clemens Bernhard Kappert zu dem Auftrag kam, einen der ersten Schreibpegel am Rhein für das entfernte Koblenz zu fertigen, ist bislang unklar. Bekannt ist lediglich, dass der Schreibpegel am 5. November 1888 in Betrieb ging und bei einem Luftangriff am 6. November 1944 zerstört wurde (Pegelstamm-buch für den Pegel I. Ordnung Koblenz, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein), sodass leider auch dieses Exemplar der von Kappert gefertigten Mechanik verloren ging. Die Pegel-  
uhr wurde im Jahr darauf ersetzt und ist bis heute in Betrieb. Die Gehäuse der beiden Pegel in Koblenz und Farge wurden von verschiedenen Gießereien hergestellt, denn während das in Farge aufgestellte Gehäuse von der Aktien-Gesellschaft "Weser" gegossen worden war (TOLLE, 1880), belegt ein Schriftzug auf der Rückseite des Koblenzer Pegelgehäuses, dass es aus der Gießerei von L. W. Bestenbostel & Sohn in Bremen stammt (Christina Klemke, Bremen, pers. Mitteilung im August 2020). Die Ähnlichkeit der durch Tolle überlieferten Skizze des Farger Pegelgehäuses mit dem Koblenzer Pegel ist dennoch unbestreitbar (Abb. 8).

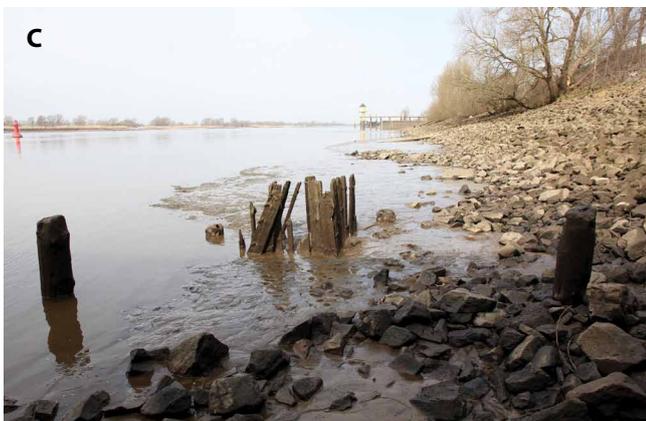
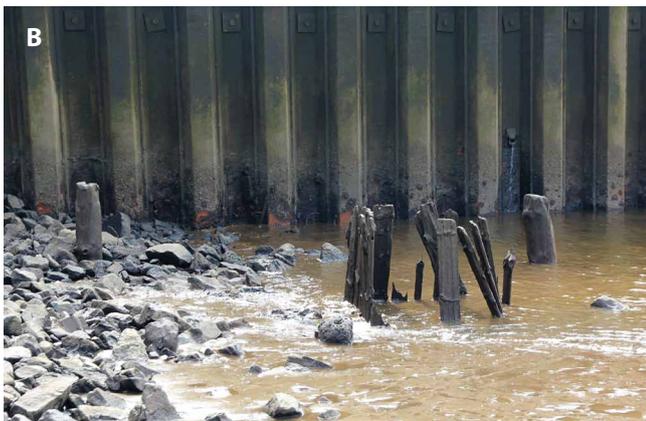
## 6 Spuren des Pegels am Standort in Farge

Seit der Errichtung des Schreibpegels am Farger Weserufer sind über 140 Jahre vergangen. In dieser langen Zeit hat sich das Gesicht des Ufers stark verändert. Mehrfach wurde die Weser vertieft, die Gebäude der Steingutfabrik Witteburg verschwanden Ende der 1950er Jahre, und in unmittelbarer Nähe entstand das Kraftwerk Farge, dessen Gelände durch hohe Stahlspundwände gegen die Weser gesichert ist. Somit war nicht erwartbar, dass noch Spuren des Pegels verblieben sein könnten. Nach einer Begehung des entsprechenden Uferbereichs bei Niedrigwasser in etwa auf Höhe der Straße Bernhardtring musste diese An-



**Abbildung 8**  
Vergleich der Gehäuse des Farger (links) und des Koblenzer Pegels (rechts). Letzteres trägt den Schriftzug C B KAPPERT BREMEN 1887 (unten). (Skizze: TOLLE, 1880. Foto: Manfred Böckling, Stadtverwaltung Koblenz, Amt für Stadtentwicklung und Bauordnung, Untere Denkmal-schutzbehörde)

nahme jedoch revidiert werden, denn nur wenige Meter von der Spundwand des Kraftwerks entfernt ragten Holzbohlen in kastenförmiger Anordnung etwa 80 Zentimeter aus dem Schlick der Weser (Abb. 9). Ihr Verfall erlaubt keine exakte Ermittlung der Abmessungen mehr, in etwa dürfte der von ihnen gebildete Holzkasten aber Kantenlängen von 1,1 und 1,3 Metern aufgewiesen haben. Knapp 3 Meter von diesem Kasten entfernt wurden vier Holzpfähle von ca. 24 Zentimetern Durchmesser vorgefunden. Zwei davon ragten nur noch wenige Zentimeter aus dem Schlick, die beiden anderen noch etwa 80 Zentimeter. Naheliegender Vermutung, dass die Holzbohlen einst den unteren, hölzernen Abschnitt des Pegelschachtes bildeten, der im Zuge der Verlegung des Pegels im Jahr 1890 an dieser Stelle errichtet wurde. Die Holzpfähle könnten Teil des zum Schutz des Schachts errichteten Kegels gewesen sein. Darüber hinaus befand sich in unmittelbarer Nähe ein Sandsteinfragment mit einer Stärke von 15 Zentimetern, an dem eine rechteckige Aussparung gerade noch erkennbar war. Die Bruchstelle läuft zudem durch eine Bohrung von 28 Millimetern Durchmesser (Abb. 10). Diese Eigenschaften passen zur Sandsteinplatte, mit der der gemauerte Teil des Schachts abgedeckt war, denn durch die rechteckige Aussparung in der Mitte der Platte könnten die Rohre für den

**Abbildung 9**

Reste hölzerner Spundbohlen in der Weser bei Farge, aufgenommen am 2. April 2018. A: Kastenförmige Anordnung der Spundbohlen. B: Lage des Spundbohlenkastens mit zwei Rundpfählen vor der Spundwand des Kraftwerks Farge. C: Blickrichtung westerabwärts mit zwei Rundpfählen im Vordergrund. Der heutige Pegel Farge bei Weserkilometer 26,26 im Hintergrund (Fotos: M. Klemke).

Schwimmer und das Gegengewicht geführt haben, während die Bohrung zur Verankerung des gusseisernen Pegelgehäuses auf der Sandsteinplatte verwendet worden sein könnte. Aufgrund dieser Befunde wird angenommen, dass sich in Farge das einzige Relikt eines der sieben vor der Weserkorrektur errichteten Schwimmerschreibpegel von Kappert befindet.

**Abbildung 10**

Wenige Meter vom Spundbohlenkasten entfernt vorgefundenes Sandsteinfragment mit einer Stärke von 15 cm und einer maximalen Kantenlänge von etwa 55 cm, das zum Sockel des Pegelgehäuses gehört haben dürfte (Foto: M. Klemke).

## 7 Zusammenfassung

Bevor Ludwig Franzius mit der Aufstellung eines Korrektionsplanes für die Unterweser begann, waren Schreibpegel nur am Bremer Hauptpegel und am Vegesacker Hafen vorhanden. Der Uhrmacher Clemens Bernhard Kappert wurde mit der Anfertigung fünf weiterer Schreibpegel beauftragt, die entlang der Unterweser bis Bremerhaven aufgestellt wurden. Die von diesen Pegeln über ein Jahr gesammelten Daten bildeten die wissenschaftliche Grundlage für die theoretische Vorbereitung zum Ausbau der Schifffahrtsstraße. Keiner der sieben Pegel aus der Zeit vor der Weserkorrektur blieb erhalten, ein zumindest sehr ähnliches Pegelgehäuse mit Kapperts Schriftzug befindet sich aber bis heute in Koblenz. In Farge wurden bei Niedrigwasser ein Sandsteinfragment sowie Holzreste gefunden, die dem Pegelschacht des Farger Schreibpegels zugeordnet werden können. Dieses Relikt ist besonders bemerkenswert, weil es die einzige bekannte Spur eines Schreibpegels aus der Zeit vor der Weserkorrektur darstellt.

### Anschrift des Verfassers

Dr. M. Klemke  
Heimatverein Farge-Rekum e. V.  
Kahnschifferhaus  
Unterm Berg 31  
28777 Bremen  
markus.klemke@uni-bremen.de

### Quellenverzeichnis

Archivgut.

Kirchenbuch Nr. 6 (Taufbuch), Liebfrauen, Münster, 1830 – 1836, Seite 36, Nr. 134, online einsehbar unter <https://data.matricula-online.eu/de/deutschland/muenster/muenster-liebfrauen/KB006/?pg=37>.

NLA HA, Hann. 90, Nr. 3081: Geheimer Regierungsrat Adolph Anton Wilhelm Tolle II. zu Berlin. Niedersächsisches Landesarchiv, Abt. Hannover.

- NLA ST Rep. 80 Nr. 13452: Der Pegel zu Farge. Niedersächsisches Landesarchiv, Abt. Stade.
- NLA ST Rep. 96 Verden Nr. 199: Die Pegelstände der Weser bei Farge. Niedersächsisches Landesarchiv, Abt. Stade.
- NLA ST Rep. 99 Nr. 10: Baumaßnahmen im Hafengebiet. Niedersächsisches Landesarchiv, Abt. Stade.
- Pegelstammbuch für den Pegel I. Ordnung Koblenz, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein, Bingen.
- StAB 2-P.8.A.6.a.5.Bd.206 (1870/58): Personenregister zum Erwerb des Bürgerrechts in den Jahrgängen 1855 – 1900. Staatsarchiv Bremen.
- StAB 4.33/1 11: Überweisung des Farger Pegels von Preußen an Bremen. Staatsarchiv Bremen.
- StAB 4.60/5 Br.-Mitte Reg.-Nr. 90/1896: Personenstandsregister. Staatsarchiv Bremen.
- StAB 10.B Kartei 443: Große Weserbrücke, Blick vom Stadtwerder auf St.-Martini-Kirche, Packhäuser, von Kapff'sche Villa, Wachtstraße, Fa. Engelken & Jacobs, St.-Petri-Dom. Staatsarchiv Bremen.
- Literaturverzeichnis**
- Adreßbuch der freien Hansestadt Bremen und der Hafenstädte Vegesack, Bremerhaven, Geestemünde. Heinrich Strack, Bremen 1872. Digitalisat: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46:1-2132>.
- BERG, F. R. T. (1870): Selbstregistrirende Pegeluhr an dem Haupt-Weser-Pegel zu Bremen. Zeitschrift für Bauwesen, Sp. 313 – 318, sowie Zeichnungen auf Blatt U im Text und Blatt 48 im Atlas, Ernst & Korn, Berlin. Digitalisat: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-1-13959565> und <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-opus-87997> (Atlas, "Selbstthätiger graphischer Wasserstandsanzeiger in Bremen").
- Centralblatt der Bauverwaltung (1890): Geheimer Baurat Adolf Tolle †. 152. Wilhelm Ernst & Korn, Berlin.
- DE THIERRY, G. (1913): Ludwig Franzius, Oberbaudirektor der Freien Hansestadt Bremen 1875 bis 1903. In: Matschoss, C. (Hrsg.): Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie – Jahrbuch des Vereines Deutscher Ingenieure, 1 – 26. Springer, Berlin.
- DEUTSCH, M. (2010): Zur Geschichte des preußischen Pegelwesens im 19. Jahrhundert. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Hrsg.: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Jg. 54, Heft 2, 65 – 74.
- FLÜGEL, H. (1988): 100 Jahre Korrektur der Unterweser und Hafengebiet in Bremen. In: Schwab, R., Becker, W. (Hrsg.): Jahrbuch der Hafengebautechnischen Gesellschaft, Bd. 42, 1987. 49 – 82. Springer, Berlin.
- FRANZIUS, L. (1882a): Projekt zur Korrektur der Unterweser. Engelmann, Leipzig.
- FRANZIUS, L. (1882b): Stromcorrection im Fluthgebiete, namentlich Entwurf der Unterweser-Correction. Centralblatt der Bauverwaltung, Nr. 34, 305 – 307, Nr. 35, 319 – 321 sowie Nr. 36, 327 – 330. Wilhelm Ernst & Korn, Berlin.
- HONSELL, M. (1889): Der Rheinstrom und seine wichtigsten Nebenflüsse von den Quellen bis zum Austritt des Stromes aus dem Deutschen Reich. Centralbureau für Meteorologie und Hydrographie im Großherzogthum Baden (Hrsg.), Ernst & Korn, Berlin.
- KELLER, H. (1901): Weser und Ems, ihre Stromgebiete und ihre wichtigsten Nebenflüsse. Band III, Die Weser von Münden bis Geestemünde. Dietrich Reimer, Berlin.
- KUPFERSCHMID, K. (1927): Die Höher- und Tieferbettungen des Rheins zwischen Basel und Mannheim von 1882 bis 1921 und ihre Bedeutung für die Schiffbarmachung dieser Stromstrecke durch Regulierung. Springer, Berlin.
- ROHDE, H. (1975): Wasserstandsbeobachtungen im Bereich der deutschen Nordseeküste vor der Mitte des 19. Jahrhunderts. In: Der Küstenausschuss Nord- und Ostsee (Hrsg.): Die Küste, Heft 28, 1 - 96, Boyens & Co., Heide i. H.
- STEHR, E. (1964): Zur Geschichte der Gewässerkunde. Die Wasserwirtschaft 54(8), 230 – 235. Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.
- TOLLE, H. (1878): Stau- und Schifffahrts-Schleuse in der Hamme bei Ritterhude zur Sicherung der Hamme-Niederung gegen Sommer-Überschwemmungen. In: Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, Bd. 24, Heft 3, Spalten 323 - 338 sowie Blätter 752 - 753 (Zeichnungen). Schmorl & von Seefeld, Hannover.
- TOLLE, H. (1880): Der selbstregistrirende Wasserstandsmesser an der unteren Weser bei Farge. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, Bd. 26, Heft 1, Spalten 55 – 58 sowie Blatt 803 (Zeichnungen). Schmorl & von Seefeld, Hannover. Digitalisat: <http://mdz-nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:12-bsb11452572-0>.
- VERHANDLUNGEN zwischen dem Senate und der Bürgerschaft vom Jahre 1878, 289 – 290. Carl Schünemann, Bremen 1878.
- VERHANDLUNGEN zwischen dem Senate und der Bürgerschaft vom Jahre 1898, 70. Carl Schünemann, Bremen 1899.
- VERHANDLUNGEN zwischen dem Senate und der Bürgerschaft vom Jahre 1899, 765. Carl Schünemann, Bremen 1900.
- WIEZOREK, H. (1997): 110 Jahre Dampfschöpfwerk Höftdeich. Wasser & Boden, Zeitschrift für Wasser- und Abfallwirtschaft, 49. Jg., Heft 1, 51 - 53, Parey Buchverlag, Berlin.

## Deutsche Hydrologische Gesellschaft

### Bericht vom Tag der Hydrologie vom 22. bis 23. März 2022 in München

Wieder am gewohnten Datum am Weltwassertag und wieder in Präsenz fand der diesjährige Tag der Hydrologie (TdH) vom 22. bis 23. März 2022 in München statt und wurde gemeinsam von der TU München (Prof. Dr.-Ing. Markus Disse, Prof. Dr.-Ing. Markus Reisenbüchler) und der Ludwig-Maximilians-Universität, LMU (Prof. Dr. rer. nat. Ralf Ludwig) ausgerichtet. Mit dem Thema "Klima, Wasser und Gesellschaft im Wandel" standen dieses Jahr die Schnittstellen von Hydrologie zu Praxis, Politik und Gesellschaft im Mittelpunkt der verschiedenen Sessions und Diskussionsrunden.

Das Bedürfnis nach Präsenz und das Interesse an diesem sehr interessanten Thema war groß, sodass mehr als 260 Personen der Einladung der Organisatoren folgten. Die Experten diskutierten über aktuelle Herausforderungen, die sich aus der Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis ergeben und vor allem welchen Beitrag die Wissenschaft hierzu leisten kann. Es ist daher nicht überraschend, dass dem Hochwasserereignis im Westen Deutschlands im Sommer 2021 mit einer eigenen Session der entsprechende Raum gegeben wurde, um den aktuellen Wissensstand aus der Sicht von Wissenschaft und Praxis zu diskutieren.

Zu den einzelnen Themenbereichen 1) Modellierung und Vorhersage von extremen Ereignissen, 2) Nicht-stationäres Verhalten hydrologischer Prozesse, 3) Auenreaktivierung – Synergien von Hochwasser- und Naturschutz und 4) Water-Food-Energy-Nexus sorgten 36 Vorträge, 4 Impulsvorträge und eine Vielzahl von Postern für ein vielfältiges Programm.

Vorausgehend sorgte die "Nacht der Hydrologie" wieder für einen guten Start. Nach langer Pause der Konferenzen in Präsenz bot dieser Abend schon die ersten spannenden Diskussionen und die Möglichkeit, Kontakte zu knüpfen und zu intensivieren, und rundete das wissenschaftliche Programm ab.

Am Ende der sehr gelungenen Veranstaltung wurde traditionell der Staffelstab an die Ausrichter des nächsten Tags der Hydrologie 2023 übergeben, der im Zeitraum 21. bis 23. März 2023 stattfinden und von Frau Prof. Dr.-Ing. Martina Flörke (Ruhr-Universität Bochum) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach (Hochschule Bochum) organisiert wird.

### Verleihung des Deutschen Hydrologiepreises 2022 an Prof. Dr. rer. nat. habil. Petra Döll

Anlässlich des Tags der Hydrologie in München wurde Frau Prof. rer. nat. habil. Petra Döll am 22. März 2022 durch die Deutsche Hydrologische Gesellschaft (DHG) mit dem Deutschen Hydrologiepreis 2022 ausgezeichnet. Damit verbunden ist eine Ehrenmitgliedschaft bei der DHG. Die Laudatio wurde von Frau

Prof. Dr. agr. Nicola Fohrer (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel), Preisträgerin des Hydrologiepreises von 2021, erstellt und vorgetragen.

Prof. Döll studierte bis zum Vordiplom an der Universität Erlangen-Nürnberg Geologie. Ihren Master of Science erwarb sie 1987 an der Universität Colorado Boulder (US) mit dem Schwerpunkt Geohydrologie. Dem schloss sich eine 4-jährige Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Geologischen Landesamt in Hamburg an. Von 1993 bis 1996 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Bodenkunde der TU Berlin, wo sie 1996 zum Dr. rer. nat. promoviert wurde. Als wissenschaftliche Assistentin war sie anschließend bis zu ihrer Habilitation im Jahre 2003 am Wissenschaftlichen Zentrum für Umweltsystemforschung der Universität Kassel tätig. Direkt im Anschluss erhielt sie einen Ruf auf eine Professur am Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main, wo sie bis heute als Professorin für Hydrologie tätig ist.

Das Ergebnis der wissenschaftlichen Arbeit von Frau Prof. Döll sind über 115 gelistete Publikationen, die bis heute über 30.000-mal zitiert wurden und in international anerkannten Fachzeitschriften erschienen sind. Seit dem Jahr 2018 wird sie jedes Jahr als hochgradig zitierte Wissenschaftlerin ausgewiesen. Ihre Forschungsthemen sind vielfältig und können im Einzelnen gar nicht dargestellt werden. Jedoch kann Frau Prof. Döll als außerordentliche Expertin in der Modellierung globaler Wasserressourcen angesehen werden. Sie leistet und leitet exzellente Forschung zur quantitativen Bewertung der weltweiten Süßwasservorräte, wobei sie deren Verfügbarkeit ins Verhältnis zum Verbrauch setzt. Von besonderer Bedeutung ist, wie sich dieses Verhältnis zukünftig angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und des Klimawandels entwickeln wird. Bereits im Jahr 1996 begann sie mit der Entwicklung des globalen hydrologischen Modells WaterGAP, ein Simulationsprogramm, mit dem die weltweiten Süßwasservorkommen und deren Nutzung abgeschätzt und vorhergesagt werden können. WaterGAP wird seitdem kontinuierlich weiterentwickelt und ist in zahlreichen Studien eingesetzt worden, u. a. den Berichten der Vereinten Nationen zur Entwicklung der weltweiten Wasserressourcen sowie des Weltklimarats IPCC. Als Mitglied des IPCC untersucht sie seit dem Jahr 2001, welchen Einfluss der Klimawandel auf die weltweiten Wasserressourcen hat. Die in WaterGAP verwendeten Ansätze und Daten haben inzwischen Eingang in viele andere Modelle gefunden. Für ihre herausragende Forschung zu Vorkommen und Management der weltweiten Wasserressourcen erhielt sie im Jahr 2019 die Henry Darcy-Medaille der European Geosciences Union (EGU).

Angesichts der Bedeutung ihrer Forschungsbeiträge ist es naheliegend, ihren umfassenden Dienst an der Gesellschaft und ihre Rolle als Hochschullehrerin zu übersehen. Prof. Döll ist eine sehr engagierte Unterstützerin von Nachwuchswissenschaftlern, Postdocs und Doktoranden in der Hydrologie und in den Natur- und Ingenieurwissenschaften. In all ihren Vorlesungen,

Seminaren und Praktika setzt sie neue Maßstäbe, indem sie innovative Ansätze der Wissenschaft und Lehre nutzt, um den Studierenden optimale Lernmöglichkeiten zu bieten.

Im Kollegenkreis wird Frau Prof. Döll für ihr Engagement und ihre motivierende Begeisterung an den hydrologischen Fragestellungen und zukünftigen Herausforderungen sehr geschätzt. Daher ist es nicht verwunderlich, dass sie überdurchschnittlich häufig zur Mitgliedschaft und Teilnahme in zahlreichen Kommissionen, Panels, Advisory Boards und Komitees eingeladen wird und zahlreiche dieser Gremien durch ihre Mitgliedschaft unterstützt.

### **Verleihung der Posterpreise beim Tag der Hydrologie 2022**

Beim diesjährigen Tag der Hydrologie in München wurde am 23. März 2022 der von der DHG organisierte "Poster Award" für ausgestellte Poster vergeben. Von allen Teilnehmern der Veranstaltung konnten Stimmen für die "Innovativste Studie", den "Besten Praxisbezug" sowie die "Beste wissenschaftliche Qualität" abgegeben werden. In der Kategorie "Innovativste Studie" ging der 1. Preis an das Poster "Ableitung stündlicher Bodenfeuchtwerte basierend auf RADOLAN Wetterradar Daten" vertreten durch die Autorenschaft Thomas Ramsauer, Philip Marzahn und Ralf Ludwig von der LMU München. Das Poster behandelt die RADOLAN Wetterradar-Daten vom DWD, die zusammen mit Informationen zur Zusammensetzung des Oberbodens und ERA5-Temperaturdaten verwendet werden, um ein hochaufgelöstes Bodenfeuchteprodukt (1 h, 1 x 1 km, open-access) für Deutschland zu erzeugen.

Der 1. Preis in der Kategorie "Bester Praxisbezug" wurde dem Poster "KIWaSuS – KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten" mit dem Autorenteam Juliana Koltermann da Silva, Markus Quirnbach und Benjamin Burrichter von der Hochschule Ruhr West zugesprochen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens KIWaSuS werden ein Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystem für urbane Sturzfluten entwickelt, in denen innovative Algorithmen innerhalb des KI-Bereichs in den Niederschlags- und Überflutungsvorhersagemodellen eingesetzt werden sollen.

In der Kategorie "Beste wissenschaftliche Qualität" erhielt das Poster mit dem Titel "Heterogene raum-zeitliche Abflussreaktion auf großräumige Klimaindizes in den Ostalpen" von Teresa Perez Ciria, David Labat und Gabriele Chiogna von der TU und LMU München den ersten Preis. Die dargestellte Forschung trägt zu unserem Verständnis der Abflussvariabilität in den Ostalpen und der Rolle von Telekonnektionsmustern bei dieser Variabilität bei.

### **Verleihung des Dissertationspreises der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft 2022**

Der von der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft vergebene Dissertationspreis ging dieses Jahr an Frau Dr. Larisa Tarasova vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH in Halle. Der Preis wurde durch die DHG-Präsidentin Prof. Dr. Britta Schmalz verliehen, die Laudatio hielt Prof. Dr. Ralf Merz.

Das übergeordnete Ziel der kumulativen Dissertation von Frau Dr. Larisa Tarasova ist es, ein tieferes Verständnis der räumlichen Muster und der zeitlichen Dynamik von Abflussereignissen und einen Rahmen für die Charakterisierung und Klassifizierung von Ereignissen zu entwickeln. Diese Aufgabe hat sie während ihrer Promotionszeit in fünf Erst-Autoren-Artikeln umgesetzt, die in internationalen Zeitschriften jeweils mit einem Impact-Faktor größer als 4 veröffentlicht wurden. Drei von diesen Artikeln stellen die Basis ihrer Dissertation dar, für die sie 2021 den Promotionspreis des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) erhalten hat.

In der Laudatio von Herrn Prof. Dr. Ralf Merz wurden neben ihrer intensiven Auseinandersetzung mit internationalen Forschungsarbeiten auch ihre intensive Publikationstätigkeit und ihre internationale Anerkennung hervorgehoben. So erhielt sie im Jahr 2018 für ihre verschiedenen Publikationen den Editors' Choice Award der Zeitschrift *Water Resources Research* und wurde 2019 zu einem Vortrag in der AGU 2020 Session H151 "Recent Advances in the Hydrologic Sciences" eingeladen, um den visionären Charakter ihres "A Process-Based Framework to Characterize and Classify Runoff Events: the Event Typology of Germany" zu würdigen. Wir wünschen Frau Dr. Larisa Tarasova für ihre weitere Laufbahn alles Gute und weiterhin viel Erfolg.

### **DHG-Mitgliederversammlung**

Im Rahmen der Tagung wurde am 22. März 2022 ebenfalls die DHG-Mitgliederversammlung abgehalten, die von der DHG-Präsidentin Prof. Dr. Britta Schmalz geleitet wurde. Es wurde über die Aktivitäten des DHG-Präsidiums seit der Wahl im November 2021 berichtet, u. a. über die Vorbereitung und Organisation der oben genannten Preise, die für 2022 geplanten Feldstipendien und das DHG-Mentoringprogramm sowie die vergangenen und geplanten Unterstützungen von Veranstaltungen.

### **DHG | Aktuell Nr. 1 2022**

Der neue Newsletter der DHG "DHG | Aktuell" ist im Mai 2022 erschienen und unter [www.dhydrog.de/news/aktuelles/](http://www.dhydrog.de/news/aktuelles/) abrufbar.

*Prof. Dr. Chiffard,  
Deutsche Hydrologische Gesellschaft*

## Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften

### in der DWA (FgHW)

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

### HochwasserTag Spezial – WebSeminar am 30. Juni 2022

Ein Jahr nach der verheerenden Hochwasserkatastrophe im Ahrtal, an der Erft oder an der Rur in der Eifel ist der Wiederaufbau im vollen Gange. Des Weiteren wird über die fachlichen und politischen Lehren diskutiert. Soviel ist aus Sicht der Expertinnen und Experten bereits heute klar: Die Fachinformationen der meteorologischen und hydrologischen Dienste sind enger miteinander zu verknüpfen, um künftig eine genauere Lagebewertung vornehmen zu können. Dafür sind sowohl bei den Wasserverbänden als auch in den Verwaltungen entsprechende personelle und infrastrukturelle Ressourcen aufzubauen.

Es hat sich gezeigt, dass die Warnsysteme des Bevölkerungsschutzes nicht ausgereicht haben, um die Bürgerinnen und Bürger in der Breite zu erreichen. Bisherige Lösungen, bspw. über Apps, enthalten oft verwirrende Informationen oder sind nicht auf allen Smartphones installiert. Neue Wege zur Warnung wie "Cell Broadcast" bzw. der Aufbau eines verlässlichen Sirenen-netzes sind anzugehen.

Es besteht die Aufgabe, den Hochwasserschutz in den betroffenen Gebieten nicht nur grundsätzlich zu ertüchtigen, sondern dabei auch die Veränderungen durch den Klimawandel zu berücksichtigen. Dazu gehört sowohl der Ausbau der Deiche als auch das Ausweisen neuer Retentionsflächen. Die Fördermittel in diesem Bereich müssen dazu deutlich ausgeweitet werden.

Mit den Experten bleiben noch weitere Fragen zu diskutieren: Beim Wiederaufbau werden neue hydrologische Bewertungsmaßstäbe angelegt – genügen diese? Gab es bislang nicht angesprochene Brüche in der Alarmkette? Berücksichtigen die Planungen im Wiederaufbau alle Aspekte der Überflutungsgefahren? Ist an "sichere Orte" und an eine "Rettungswegeplanung" gedacht und werden diese kommuniziert?

Traditionell ist der HochwasserTag eine Gemeinschaftsveranstaltung von DWA und FgHW. Anlässlich der Jährung mehrerer katastrophaler Überflutungen in Deutschland richten wir am 30. Juni 2022 ein kostenfreies WebSeminar als Spezial zum HochwasserTag aus. Wir laden Sie herzlich ein, daran teilzunehmen (<https://de.dwa.de/de/seminare.html>).

### 7. KLIWA-Symposium – "ZU WENIG | ZU VIEL – Wasserwirtschaft zwischen Trockenheit und Starkregen" am 14. und 15. September 2022 in Ingelheim am Rhein

Die Kooperation KLIWA der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienstes befasst sich seit über 20 Jahren länderübergreifend mit den wasserwirtschaftlichen Herausforderungen des Klimawandels auf regionaler Ebene. Die aktuellen Ergebnisse werden regelmäßig in öffentlichen Fachsymposien präsentiert.

Auf dem 7. KLIWA-Symposium werden die neuesten Ergebnisse aus den Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels in den beteiligten Bundesländern vorgestellt. Eingerahmt wird das breit gefächerte Programm durch Beiträge seitens der Politik und Klimaforschung.

Die Veranstaltung richtet sich vor allem an Fachleute und Entscheidungsträger aus dem politischen und wasserwirtschaftlichen Bereich, aber auch an die interessierte Öffentlichkeit. Neben Erkenntnissen zur klimatischen Entwicklung stehen bei KLIWA aktuelle Untersuchungen in den Bereichen Starkregen, Trockenheit, Gewässerökologie, Hoch- und Niedrigwasser, Grundwasser sowie Ensemble-Untersuchungen zum Abflussregime im Vordergrund. Detaillierte Informationen zu Programm und Anmeldung werden auf der KLIWA-Homepage bereitgestellt ([www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)).

### Campus Suderburg wird Wasser-Quartier

Als Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz setzt sich die Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften am Campus Suderburg dafür ein, Leitungswasser statt Flaschenwasser zu verwenden und intensiv für die Nutzung von Leitungswasser zu werben. "Global denken, lokal handeln", so lässt sich die jüngste Initiative von Prof. Klaus Röttcher von der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften zusammenfassen. Anlässlich des diesjährigen "Weltwassertags" am 22. März 2022 ist der Campus Suderburg zum "Wasser-Quartier" ernannt worden, wobei der Samtgemeindebürgermeister Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Marwede die Schirmherrschaft übernommen hat.

Der Campus Suderburg ist damit das 20. Wasser-Quartier in Deutschland und das erste an einer Hochschule. Ziel der Wasserquartiere ist es, eine Wasserwende zu erreichen und den Trend zu immer mehr Flaschenwasser umzukehren.

Der Pro-Kopf-Flaschenwasserkonsum in Deutschland ist heute 15-mal höher als in den 1970er Jahren. Dadurch werden viel Plastikmüll und unnötige CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, insgesamt 1,5-mal so viel wie vom innerdeutschen Flugverkehr. Daher hat der Verein "a tip: tap e. V." (deutsch: ein Tipp: Leitungswasser – <https://atipatp.org/>) die Initiative Wasserwende gegründet, um diesen Trend umzukehren und das Trinkwasser als Getränk Nr. 1 ins Rampenlicht zu rücken. Der Trend zum Trinkwasser soll durch die sich gegenseitig verstärkenden Elemente Bildung, Beratung, Aktionen für Bürger/-innen, Trink-Orte und positive Kommunikation erreicht werden ([www.wasserwende.org](http://www.wasserwende.org)).

### Neues Gesprächsformat – "Lunchbreak-Sessions" in Vorbereitung

Die FgHW bietet für ihre Mitglieder ein neues Online-Format für den fachlichen Austausch an. Für die zweite Jahreshälfte sind zwei dieser interaktiven WebSessions als max. einstündige Treffen in Vorbereitung. Folgende grundsätzlichen Themenstellungen werden mit namhaften Vertreterinnen und Vertretern aus Forschung und Praxis diskutiert: "Neue Forschungsergebnisse, die unmittelbar Aufgaben der Praxis adressieren" und "Anforderungen aus der Praxis, die von der Forschung beantwortet werden können".

Details zu den Inhalten werden auf den Internetseiten und in den FgHW-News mitgeteilt. Seien Sie neugierig, unsere Einladungen werden wir mit unserem FgHW-Newsticker aussenden und auf der DWA-Homepage ankündigen ([www.fghw.de/aktuelles](http://www.fghw.de/aktuelles)).

### Veröffentlichung in der FgHW-Schriftenreihe

Die Schriftenreihe der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften "Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung" feiert im Jahr 2022 ihr 20-jähriges Bestehen. Seit dem ersten Heft, welches die Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 in Suderburg enthielt, sind inzwischen 42 Bände erschienen, Band 43 befindet sich in Planung. Ziel der Reihe ist es seit jeher, den zahlreichen von der FgHW organisierten bzw. unterstützten Veranstaltungen und Seminaren ein etabliertes Medium zur Veröffentlichung der Beiträge in Form wissenschaftlicher Fachartikel zu bieten. Seit 2015 erscheint die Reihe als Open-Access-Publikation in einem digitalen Format unter einer Creative-Commons-Lizenz, wobei jeder Band über eine ISBN und einen Digital Object Identifier (DOI) verfügt.

Sie planen eine Veranstaltung mit Unterstützung der FgHW und möchten dazu einen Tagungsband herausgeben? Gern besprechen wir mit Ihnen die Details zu Ihrer Veröffentlichung. Wenden Sie sich dazu einfach an die Geschäftsstelle der FgHW (Dipl.-Geogr. Dirk Barion) oder den Schriftleiter Dr. Christian Reinhardt-Imjela.

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

## Neue Publikationen

**Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) (2021):** Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA: Monitoringbericht 2021. 78 Seiten.  
Download: [www.kliwa.de/publikationen-monitoringberichte.htm](http://www.kliwa.de/publikationen-monitoringberichte.htm)

**Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (Hrsg.) (2022):** Bayerisches Gewässer-Aktionsprogramm 2030. Broschüre, 80 Seiten.  
Download: [www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv\\_wasser\\_022.htm](http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_wasser_022.htm)

**Bundesamt für Naturschutz und Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (Hrsg.) (2022):** Die Wiederansiedlung der Europäischen Auster – Aktiver Meeresnaturschutz in der deutschen Nordsee. Broschüre, 14 Seiten.  
Download: [www.bfn.de/publikationen/broschuere/die-wiederansiedlung-der-europaeischen-auster](http://www.bfn.de/publikationen/broschuere/die-wiederansiedlung-der-europaeischen-auster)

**Drost, U., Ell, M. (2022):** Gewässerrandstreifen am Beispiel Bayerns – Kommentar zur Rechtslage für die Praxis. 256 Seiten, 1. Auflage, Richard Boorberg Verlag.  
ISBN: 978-3-415-07201-5

**IKSE – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (Hrsg.) (2022):** Internationaler Bewirtschaftungsplan für die Flussgebietseinheit Elbe, Teil A: Aktualisierung 2021 für den Zeitraum 2022 – 2027. 203 Seiten.  
Download: [www.ikse-mkol.org/publikationen/hochwasserschutz](http://www.ikse-mkol.org/publikationen/hochwasserschutz)

**IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (Hrsg.) (2022):** Internationaler Warn- und Alarmplan Rhein (IWAP) – Meldungen 2020. Fachbericht 285, 23 Seiten.  
Download: [www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/fachberichte](http://www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/fachberichte)

**IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (Hrsg.) (2022):** Rhein 2040. Der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient. Broschüre, 27 Seiten.  
Download: [www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/broschueren](http://www.iksr.org/de/oeffentliches/dokumente/archiv/broschueren)

**Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2022):** Hafenmonitoring – Teil B: Emissionsinventare der Hafengebiete Neuss und Duisburg. Fachbericht 123, 92 Seiten.  
Download: [www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/publikationen/fachberichte](http://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/publikationen/fachberichte)

**Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) (Hrsg.) (2022):** Wasserversorgung in Rheinland-Pfalz – Vom Grundwasser zum Trinkwasser. Broschüre, 3. Auflage, 16 Seiten.  
Download: <https://lfu.rlp.de/de/unser-amt-service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen>

**Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (2022) (Hrsg.):** Wasserversorgungsplanung Brandenburg – Sachlicher Teilabschnitt mengenmäßige Grundwasserbewirtschaftung. 68 Seiten.  
Download: <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/ueber-uns/veroeffentlichungen>

**Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.) (2022):** Klimawandelmonitoring im Land Brandenburg – Aktualisierungsbericht. Fachbeiträge des LfU, Heft 160, 123 Seiten.  
Download: <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/ueber-uns/veroeffentlichungen>

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2022):** Förderrichtlinien der Wasserwirtschaftsverwaltung – FöRiWWV. Broschüre, 80 Seiten.  
Download: <https://mkuem.rlp.de/de/service/publikationen>

**Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz; GWT-TUD (Hrsg.) (2022):** Pilotprojekt zur Eignung von in vitro-Biotestverfahren für ein effektbasiertes Monitoring in Oberflächengewässern – Abschlussbericht. 36 Seiten.  
Downloads: [www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/veroeffentlichungen\\_webshop/schriften\\_zum\\_downladen/downloads\\_gewassergute](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/veroeffentlichungen_webshop/schriften_zum_downladen/downloads_gewassergute)

**Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.) (2022):** Atmosphärisches Konvektionspotential über Sachsen. Schriftenreihe des LfULG, Heft 2/2022. Autoren: Barfus, K., Bernhofer, C.; Schriftenreihe, Heft 2/2022, 94 Seiten.  
Download: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/39212>

**Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (Hrsg.) (2021):** Integrale Hochwasserschutzkonzepte in Thüringen – Retentionsvolumen einer natürlichen Aue. Fachstandpunkt 18/2021, 133 Seiten.  
Download: <https://tlubn.thueringen.de/service/publikationen>

**Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021):** Gewässertyp des Jahres 2022: Grundwasser. Faltblatt, Verlag Umweltbundesamt.  
Download: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) unter "Publikationen"

**Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022):** Umsetzung des Nationalen Aktionsplans zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP) – Pilotstudie zur Ermittlung der Belastung von Kleingewässern in der Agrarlandschaft mit Pflanzenschutzmittel-Rückständen. Autoren: Liess, M., Liebmann, L., Lück, M., Vormeier, P., Weisner, O., Foit, K., Knillmann, S., Schäfer, R.B., Schulze, T., Krauss, M., Brack, W., Reemtsma, T., Halbach, K., Link, M., Schreiner, V.C., Schneeweiss, A., Möder, M., Weitere, M., Kaske, O., von Tümpling, W., Gunold, R., Ulrich, N., Paschke, A., Schüürmann, G., Schmitt Jansen, M., Küster, E., Borchardt, D.; Texte 7/2022, 319 Seiten, Verlag Umweltbundesamt.  
Download: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) unter "Publikationen"

## Termine

**Die folgenden Ankündigungen entsprechen dem Wissensstand zum Redaktionsschluss am 30.04.2022.**

### 45. Dresdner Wasserbaukolloquium 2022

14./15. Juni 2022 in Dresden

Webseite: <https://wasserbaukolloquium.de/2022>

### 12th Water Research Horizon Conference

21./22. Juni 2022 in Essen

Webseite: [www.water-research-horizon.de](http://www.water-research-horizon.de)

### 25. Gewässersymposium des LUNG Mecklenburg-Vorpommern

22. Juni 2022 in Bad Doberan

Webseite: [www.lung.mv-regierung.de/dateien/landeslehrst\\_25\\_programm.pdf](http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/landeslehrst_25_programm.pdf)

### 13. Forum Hochwasserrisikomanagement

23. Juni 2022 in Jena

Webseite: [www.bauing.uni-kl.de/fww/veranstaltungen/13-forum-hwrm-23062022](http://www.bauing.uni-kl.de/fww/veranstaltungen/13-forum-hwrm-23062022)

### RRC Annual Conference 2022

Hybrid-Veranstaltung

28./29. Juni 2022 in Warwickshire (England)

Webseite: [www.therrc.co.uk/rrc-annual-conference-2022](http://www.therrc.co.uk/rrc-annual-conference-2022)

### 4th International Conference of I.S. Rivers

4. bis 8. Juli 2022 in Lyon (Frankreich)

Webseite: [www.isrivers.org](http://www.isrivers.org)

### 8. WBW-Gewässerdialo g "Agile Iller"

14. Juli 2022 in Unterbalzheim

Webseite: [www.wbw-ev.de/8-wbw-gewaesserdialo g](http://www.wbw-ev.de/8-wbw-gewaesserdialo g)

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

7. bis 10. August 2022 in Berlin

Webseite: [www.sil2022.org](http://www.sil2022.org)

### Quellen – die vergessenen Lebensräume

8. September 2022 in Basel (Schweiz)

Webseite: <https://scnat.ch/de/events> unter "Aktuell"

### 7. Symposium des Kooperationsvorhabens "Klimaveränderung und Wasserwirtschaft" (KLIWA)

14./15. September 2022 in Ingelheim am Rhein

Webseite: [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

### Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL)

19. bis 23. September 2022 in Konstanz

Webseite: [www.dgl-ev.de/veranstaltungen/jahrestagungen-dgl](http://www.dgl-ev.de/veranstaltungen/jahrestagungen-dgl)

### Fachforum Blaues Band Spree-Havel

20./21. September 2022 in Havelberg

Webseite: [www.bfn.de/veranstaltungen/blau-es-band-spree-havel](http://www.bfn.de/veranstaltungen/blau-es-band-spree-havel)

### 23. Gewässermorphologisches Kolloquium

2./3. November 2022 in Koblenz

Webseite: [www.bafg.de](http://www.bafg.de) unter "Wissen/Veranstaltungen"

### KFKI-Konferenz "Baltic Storm Surge 1872"

14. November 2022 in Rostock

Webseite: [www.kfki.de](http://www.kfki.de)

### 53. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen

12. Januar 2023 in Aachen

Webseite: [www.iww.rwth-aachen.de/go/id/lygz](http://www.iww.rwth-aachen.de/go/id/lygz)

### 4. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium

22./23. Februar 2023 in Bochum

Webseite: [www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau](http://www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau) unter "Veranstaltungen"

### Tag der Hydrologie 2023

22./23. März 2023 in Bochum

Webseite: [www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau](http://www.hochschule-bochum.de/fbb/einrichtungen-im-fachbereich/labore/labor-fuer-wasserbau) unter "Veranstaltungen"

### 13th Symposium for European Freshwater Sciences

19. bis 23. Juni 2023 in Newcastle upon Tyne (England)

Webseite: [www.sefs13.com](http://www.sefs13.com)

### 19. Deutsches Talsperrensymposium

4. bis 6. Juli 2023 in Lindau

Webseite: [www.talsperrensymposium.de](http://www.talsperrensymposium.de)

## Erläuterung zur Titelseite

Die rechte, untere Fotoaufnahme zeigt die Antenne des X-Band-Radars der Emschergenossenschaft auf dem Gelände des Landesumweltamtes am Standort Essen-Bredeney aus dem Jahr 2004. Das ursprüngliche Forschungsradar des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover wurde seit Ende der 1990er Jahre bis zum Abbau im Jahr 2007 durch die Emschergenossenschaft für die Erfassung des Regengeschehens genutzt. Zu erkennen sind zusätzlich zwei Mikrowellenempfänger für 10,5 GHz und 17,5 GHz Frequenzen, die zur kontinuierlichen Messung der Radarsignaldämpfung für den Zeitraum von 11/2002 bis 10/2007 und über eine Entfernung von 29,6 km installiert waren. Auf Grundlage der Kombination von Radar- und unabhängiger Mikrowellenreferenzmessung konnten wichtige Erkenntnisse zur Ableitung von Algorithmen für die operationelle Dämpfungskorrektur der Radarregenmessung im X- und C-Band Frequenzbereich gewonnen werden.

Die Übersichtskarte links oben zeigt die kumulierten Radarregenhöhen für das extreme Starkregenereignis am 26. Juli 2008 in Dortmund mit einer maximalen Radarregenhöhe von 227 mm. Innerhalb des Ereignisses sind über 2 Stunden 190 mm Niederschlag gefallen; dieser Wert entspricht etwa dem 2,5-fachen Wert der statischen Regenhöhe nach KOSTRA-DWD 2010 R für die Dauerstufe D = 120 min und die Wiederkehrzeit T = 100 a. Besonders auffällig ist die kleinräumige Ausdehnung des Regengeschehens, welche charakteristisch für Starkregenereignisse infolge lokaler Konvektion ist. An einer terrestrischen Station in Dortmund-Martens wurden 113,3 mm gemessen, an einer weiteren Station auf dem Gelände der Universität Dortmund sogar 203 mm. Datengrundlage für die abgebildeten Radarregendaten sind Rohdaten des Deutschen Wetterdienstes (DX-Produkt), die zeitschrittweise mithilfe verschiedener Korrekturalgorithmen, insbesondere unter Verwendung einer strahlweisen Dämpfungskorrektur, aufbereitet worden sind.

Das Diagramm oben rechts zeigt den Vergleich partieller Serien nach dem Arbeitsblatt DWA-A 531 für die Dauerstufe D = 60 Minuten für eine synthetisch generierte Regenzeitreihe mit einer unabhängigen Beobachtungszeitreihe, die 88 Jahre umfasst. Augenfällig ist die gute und plausible Übereinstimmung der partiellen Serien bis zu einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren. Wenngleich der Eignungsnachweis synthetischer Zeitreihen in dem Fachbeitrag "Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland" in diesem

Heft nur bis zu einer Häufigkeit von 0,1 /a untersucht wurde, so zeigt der Vergleich doch das hohe Potenzial synthetischer Niederschlagszeitreihen.

Das Box-Whisker-Diagramm links unten aus dem Fachbeitrag "Kontinuierliche synthetische Niederschläge für stadthydrologische Bemessungen in Deutschland" fasst am Beispiel des Standardfehlers (RMSE) die Kanalnetzrechnungsergebnisse unter Verwendung synthetischer Niederschlagszeitreihen als Belastungsgröße für insgesamt 45 untersuchte Validierungsstandorte zusammen. Zielgröße ist die mithilfe von Kanalnetzmodellen berechnete Überstauhäufigkeit der Schächte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse auf Grundlage der synthetischen Zeitreihen gegenüber der Verwendung einer Nachbarstation (Praxisszenario) einen geringeren Fehler aufweisen.

Dr. Stefan Krämer,  
 Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH  
 Dipl.-Ing. Andreas Kuchenbecker,  
 HAMBURG WASSER

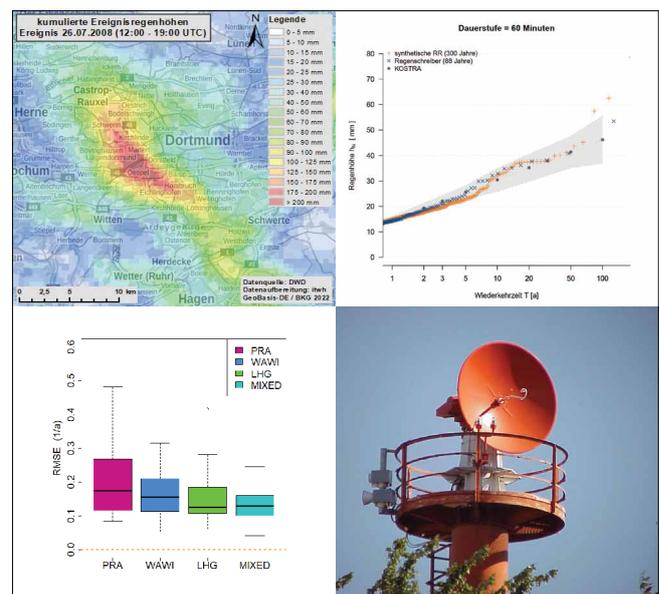


Foto: Stefan Krämer