



Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2023 in Bochum

Martina Flörke, Christoph Mudersbach (Herausgeber)



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

HEFT **44.23**

Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2023 in Bochum

Martina Flörke, Christoph Mudersbach (Herausgeber)



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

Martina Flörke, Christoph Mudersbach (Herausgeber)

Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien.

Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2023 in Bochum

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 44.23

ISBN: 978-3-96862-608-6

DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.44.23

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2023

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische

Wissenschaften in der DWA

Geschäftsstelle

Theodor-Heuss-Allee 17

D – 53773 Hennef

Tel.: 02242/872 – 161

Fax: 02242/872 – 184

info@fghw.de

www.fghw.de

Schriftleitung:

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, Ohlstadt

Umschlagbearbeitung:

Christiane Krieg (DWA)

Univ.-Prof. Dr. Robert Jüpner

Fachgemeinschaft Hydrologische

Wissenschaften in der DWA

Dr.-Ing. habil. Uwe Müller

Hauptausschuss Hydrologie und

Wasserbewirtschaftung der DWA

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt
nicht der Verantwortung der Herausgeber.



Vorwort

Am 22. und 23. März 2023 fand der Tag der Hydrologie (TdH) in Bochum statt und wurde vom Lehrstuhl für Ingenieurhydrologie und Wasserwirtschaft der Ruhr-Universität Bochum (Prof. in Dr.-Ing. Martina Flörke) sowie vom Lehrstuhl für Wasserbau und Hydromechanik der Hochschule Bochum (Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach) ausgerichtet. Der Tag der Hydrologie wurde in Abstimmung und mit Unterstützung der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft e.V. (DHG), dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) sowie der Emschergenossenschaft und dem Lippeverband (EGLV) durchgeführt.

Die Tagung stand unter dem Leitthema „**Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien**“ und wollte Aufmerksamkeit schaffen für die Bedeutung unserer Wasserressourcen, deren Schutz und Umgang mit Extremsituationen – heute und zukünftig. Die breitgefächerten Herausforderungen für die Wasserwirtschaft wurden mit fünf thematischen Schwerpunkten beleuchtet:

- **Urbane Hydrologie:** Eine wassersensible Stadtentwicklung (Stichwort Schwammstadt) als maßgeblicher Baustein für eine klimagerechte Stadtgestaltung
- **Wasserqualität im globalen Wandel:** Risiken durch Stoffeinträge begrenzen und vermeiden
- **KI in der Hydrologie:** Die Entwicklung und Anwendung digitaler Technologien ist für eine effiziente und nachhaltige Gewässerbewirtschaftung in Gegenwart und Zukunft unabdingbar
- **Monitoring und Analyse hydrologischer Extreme:** effiziente und effektive Monitoringkonzepte, neue methodische Ansätze entwickeln, Wissenslücken wahrnehmen und schließen
- **Zukünftige Herausforderungen an die Wassergovernance:** Fakten bilden, um Verwaltungen stärken, Datenflüsse zu verbessern und die Öffentlichkeit zu informieren

In dem vorliegenden Tagungsband findet sich eine Vielzahl der Beiträge des TdH 2023 wieder. Wir wünschen Ihnen bei der Lektüre des Tagungsbandes gute Erkenntnisse und viele neue Einsichten in die aktuellen Herausforderungen der Wasserwirtschaft.

Des Weiteren geht ein Dank an die Grußrednerinnen und Grußredner, die Vortragenden und die Mitglieder des Wissenschaftlichen Komitees, sowie an die vielen Helferinnen und Helfer, die den TdH 2023 zu einer erfolgreichen Veranstaltung gemacht haben.

Martina Flörke, Christoph Mudersbach

Bochum, 2023

Heft 44 2023 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Nachhaltiges Wassermanagement - Regionale und Globale Strategien

Session 1: Monitoring und Analyse hydrologischer Extreme

Helge Bormann, Jenny Kebschull

Wirkung von Ereignisbündeln (Compound events) auf Binnenhochwasserereignisse in den Küstenniederungen 5

Christoph Mudersbach, Oliver Buchholz, Holger Hoppe

Wege zu einer integralen Bewertung von Hochwasser- und Starkregengefahren 15

Kerstin Stahl, Jost Hellwig, Michael Stölzle

Trockenheit im Stresstest: Modellexperimente für Niedrigwasser und Quellschüttungen in Baden-Württemberg 21

Daniel Schwandt, Martin Helms, Gerd Hübner

Analyse der flussgebietsübergreifenden extremen Niedrigwasser der Jahre 1921, 1947 und 2018 in Deutschland 33

Session 2: KI in der Hydrologie

Henning Oppel, Georg Johann, Svenja Fischer, Jenny Kupzig und Benjamin Mewes

Machine-Learning in der Hochwasserprognose – eine Chance zur Integration von gewichteten Ensemble-Ansätzen? 45

Anika Hotzel, Christoph Mudersbach

Verbessertes eventbasiertes Hochwasserwarnsystem für kleine Einzugsgebiete mit Hilfe künstlicher Intelligenz und dem CatRaRE-Katalog 57

Michel Spils, Sven Tomforde, Ralf Hach, Henke Hund

Machine learning Models for flood forecasting in small catchments 65

Session 3: Zukünftige Herausforderungen an die Wasser-Governance

Georg Johann, Daniela Falter, Alexander Hartung, Angela Pfister, Burkhard Teichgräber und Adrian Treis

Umgang mit Extremhochwasser im dicht besiedelten Raum - Die Roadmap Krisenhochwasser 75

<i>Thorben Uschan, Tim J. Diemel, Martina Flörke</i>	
Wasserbezogene Nutzungskonflikte – Ergebnisse einer deutschlandweiten Medienrecherche	85
<i>Ali A. Besalatpour, Shahrooz Mohajeri, Daniel Anatoliyevic Kaufman, Esmaeil Adib</i>	
Ein digitales Tool für nachhaltige wasserwirtschaftliche Entscheidungen in einem anspruchsvollen Einzugsgebiet – Zayandeh Rud: von der Ideenentwicklung zur praktischen Anwendung	93
<i>Philipp Huttner, Patrick Keilholz, Katja Eulitz, Ferdinand Flechtner</i>	
Kompensation der unterirdischen Verdichtung im urbanen Bereich durch Grundwasserüberleitungsanlagen und deren Dimensionierung mittels Grundwassermodellierung	105
<i>Franziska Tügel, Elsa Kronke, Katrin Nissen, Pia Gronau, Lennart Steffen, Uwe Ulbrich, Reinhard Hinkelmann</i>	
Hydrodynamische N-A-Ensemblesimulationen mit variablen räumlich-zeitlichen Verteilungen von Starkniederschlägen	113
<i>Philipp Huttner, Katja Eulitz, Patrick Keilholz</i>	
Nachhaltige Speicherbewirtschaftung durch Integrierte Wasserhaushaltsmodellierung mit MIKE SHE während langjähriger Trockenperioden	125
Siegfried-Dyck Preisträger	
<i>Uwe Grünewald</i>	
Hydrologie und Wasserbewirtschaftung in Deutschland - es entwickelt(e) sich	135

Wirkung von Ereignisbündeln (*Compound events*) auf Binnenhochwasserereignisse in den Küstenniederungen

Helge Bormann, Jenny Kebschull

Zusammenfassung

Neben Sturmfluten stellen Binnenhochwasserereignisse eine zunehmend große Gefährdung für die Küstenniederungen dar. Insbesondere das Zusammentreffen beider Ereignistypen stellt die örtlichen Entwässerungsverbände vor große Herausforderungen. Die Auswertung historischer Binnenhochwasserereignisse an der Deutschen Nordseeküste am Pegel Knock bei Emden zeigt, dass in der Vergangenheit vor allem moderate Sturmtiefserien in Kombination mit großräumigen, ergiebigen Niederschlägen zu einer Überlastung der Binnenentwässerung geführt haben, während Sturmfluten und Niederschläge allein gut bewältigt werden konnten. Die Auswertung der Szenariorechnungen basierend auf dem MPI Modell für das RCP8.5-Szenario lässt vermuten, dass die Intensität von Ereignisbündeln bzw. *Compound Events* unter Annahme des Klimawandels noch deutlich zunehmen wird. Daraus wird sich eine zunehmende Häufigkeit und Intensität von Systemüberlastungen der Binnenentwässerung an der Nordseeküste ergeben, wenn nicht rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden.

1. Einleitung

Die Entwässerungsverbände an der Nordseeküste betreiben ihre Systeme immer häufiger am Rande der Leistungsfähigkeit und sind sich dessen bewusst, dass die Auswirkungen des Klimawandels zukünftig noch größere Anforderungen an die Entwässerungsinfrastruktur stellen werden (Bormann et al., 2018, 2020, 2022). Neben den oben genannten Einzelereignissen stellen insbesondere Ereignisbündel (*Compound Events*) eine besondere Herausforderung für Hochwasserschutz und Binnenentwässerung dar. Treten z.B. Sturmfluten und ergiebige Regenfälle gleichzeitig auf, führt oft schon eine Kombination moderater Einzelereignisse zu einer Überlastung der Binnenentwässerung (van den Hurk et al., 2015). Zu beobachten war ein solches Ereignis zuletzt im Februar 2022, als eine Serie von Sturmtiefs (Ylenia, Zeynep, Antonia) an der Niedersächsischen Nordseeküste von tagelangen, ergiebigen Regenfällen begleitet wurde.

Im Rahmen der Klimaanpassung stellt sich nun die Frage, welche Kombinationen von Ereignissen unter den Bedingungen des Klimawandels zu erwarten sein werden, und inwieweit die Wirkungen dieser Ereignisse das Bekannte übertreffen werden. Hierzu werden in dieser Studie hochaufgelöste, konsistente Szenariosimulationen des MPI-Modells genutzt, die sowohl den Meeresspiegel als auch das regionale Klima einer RCP8.5 Welt in hoher zeitlicher Auflösung beschreiben. Dadurch kann sowohl eine Analyse potenzieller zukünftiger *Compound Events* als auch ein Vergleich mit Vergangenheit und Kontrollperiode durchgeführt werden, was wiederum die Beschreibung der Anpassungsnotwendigkeiten an derartige Ereigniskombinationen ermöglicht und deren Dringlichkeit unterstreicht.

2. Das Projekt WAKOS

Das vom BMBF im Rahmen des RegKlim-Programms geförderte Verbundprojekt „WAKOS: Wasser an den Küsten Ostfrieslands“ (2020-2023) untersucht die Frage, welche Folgen ein gleichzeitiges Auftreten, ggfs. über einen längeren Zeitraum, von Sturmfluten und Starkregenerereignissen auf den Insel- und Küstenschutz, die Binnenentwässerung und die Süßwasserversorgung und damit auf das Leben auf dem Festland und den Ostfriesischen Inseln hat.

Wasser und damit verbundene Naturgefahren stellen die Region seit jeher vor große Herausforderungen, sowohl kurzfristig beim Risikomanagement, als auch langfristig bei der Anpassung an den Klimawandel. Gemeinsam mit regionalen Kooperationspartnern untersucht das Konsortium aus dem Helmholtz-Zentrum Hereon, dem NLWKN, den Universitäten Hamburg und Oldenburg und der Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth, wie die Küstenregion gegenüber *Compound Events* und im Klimawandel nachhaltig geschützt werden kann. Die Arbeitsschwerpunkte des Projekts sind:

- die Identifizierung und Modellierung von (Extrem-) Ereignisbündeln,
- die Aufdeckung möglicher Wirkungsketten,
- die Offenlegung von Anpassungskapazitäten und des Bedarfs an Klimainformationen in der Region,
- die Zielgruppen-spezifische Aufbereitung von Klimaänderungsinformationen, und
- die Bereitstellung von Informationen für Strategien zur Stärkung der Widerstands- und Anpassungsfähigkeit der Region.

2.1 *Compound Events*

Compound Events sind durch das Einwirken mehrerer Ereignisse auf ein System definiert. Eine Typologie meteorologischer Ereignisbündel wurde von Zscheischler et al. (2020) vorgeschlagen. Diese unterscheidet zwischen

- Multivariaten *Compound Events* (gleichzeitiges Auftreten verschiedener Ereignisse, die auf das gleiche System wirken),
- Räumlichen *Compound Events* (Auftreten von Ereignissen in verschiedenen Regionen, die das gleiche System beeinflussen),
- Zeitlichen *Compound Events* (mehrere aufeinander folgende Ereignisse, die auf dasselbe System wirken), sowie
- Ereignissen, die nur unter bestimmten Voraussetzungen auftreten (*preconditioned Compound Events*).

In dieser Studie wird das Zusammentreffen von Sturm und ergiebigem Niederschlag an der Nordseeküste untersucht. Die Erfahrung zeigt, dass es aufgrund der technischen Begrenzung der in der Deichlinie installierten Pumpkapazität insbesondere dann zu einer Systemüberlastung kommt, wenn intensive Niederschläge über einen längeren Zeitraum fallen, in dem die Pumpleistung durch hohe Außenwasserstände reduziert ist.

2.2 Der Betrachtungsraum

Der Betrachtungsraum des WAKOS-Projekts liegt im westlichen Ostfriesland und umfasst das Verbandsgebiet des 1. Entwässerungsverbands Emden (1. EVE) und die Insel Norderney. Die hier betrachteten *Compound Events* (Sturmflut, Regenfälle) sind v.a. für die tiefliegenden Gebiete an der Festlandsküste von hoher Relevanz und werden anhand des 1. EVE analysiert. Das Verbandsgebiet des I. EVE liegt im Nordwesten Ostfriesland und wird meeresseitig durch die Emsmündung, den Dollart und die Nordsee begrenzt. Die Größe des Verbandsgebiets beträgt 465 km² und weist einen Flächenanteil von 1/3 unter Normalhöhennull (NHN) auf (Abb. 1). Voraussetzung für die Besiedlung und Nutzung des Gebietes ist eine dauerhafte und zuverlässige Entwässerung. Derzeit unterhält der I. EVE ein Gewässernetz von 1.100 km Länge,

das den Abfluss zu den zwei Siel- und Schöpfwerken Knock und Greetsiel leitet. Je nach Außenwasserstand kann entweder gesielt (derzeit ca. 1/3 der Entwässerung) oder muss gepumpt werden (derzeit ca. 2/3 der Entwässerung). Im Falle von extrem hohen Außenwasserständen sinkt die Pumpleistung aufgrund der zunehmenden geodätischen Förderhöhen signifikant ab. Im Zusammentreffen dieser hohen Außenwasserstände mit ergiebigen Niederschlägen liegt die Gefahr der betrachteten *Compound Events*, da sie zu Überschwemmungen im Binnenland führen können.

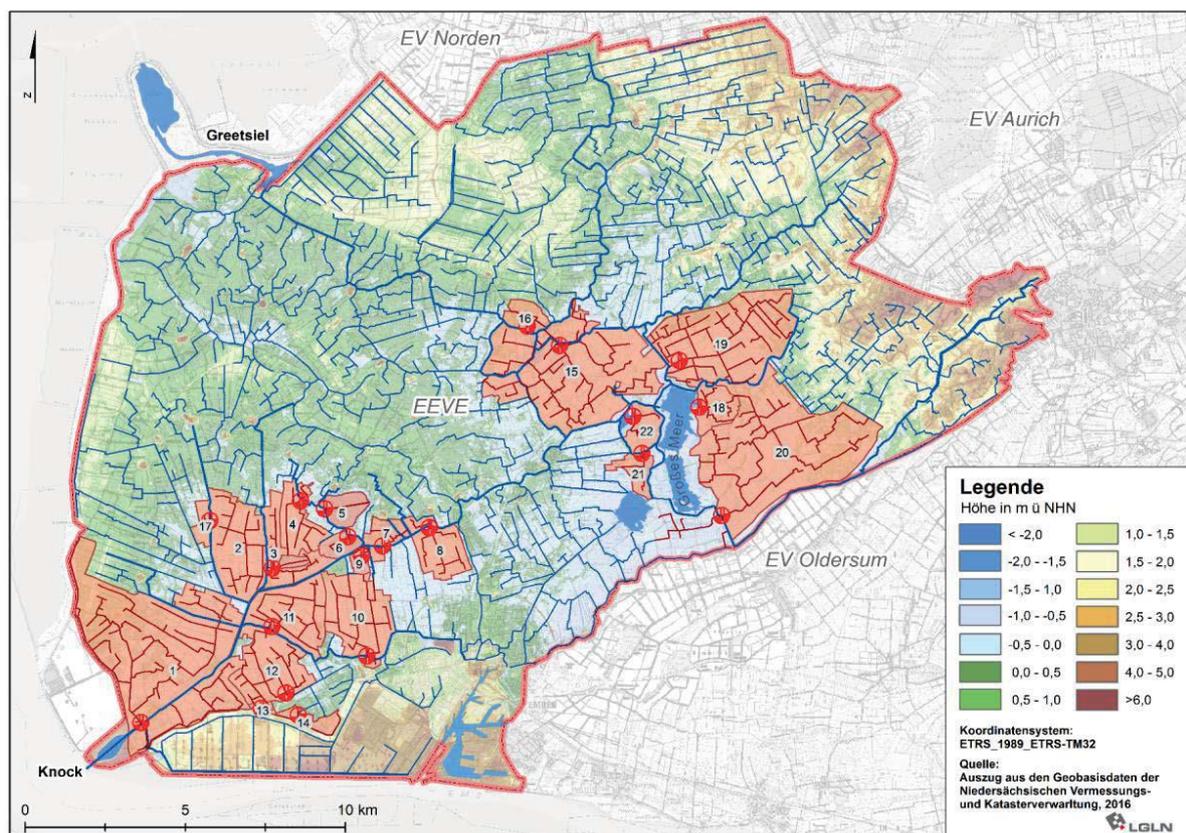


Abb. 1: Verbandsgebiet des I. EVE; dargestellt sind neben der Topographie die Verbands-grenze (rote Linie), die Gewässer (dunkelblau), die Unterschöpfwerksgebiete (orange, nummeriert), sowie die Siel- und Schöpfwerke Knock und Greetsiel.

2.3 Verfügbare Daten und Szenarien

Für die Analyse der in der Vergangenheit aufgetretenen *Compound Events* stehen für den Zeitraum von 2000 bis 2019 am Siel und Schöpfwerk Knock, am Binnenpegel Bedekaspeler Marsch sowie an der DWD-Station Emden folgende zeitlich hoch aufgelösten Daten zur Verfügung:

- Außenwasserstände am Pegel Knock, minütlich,
- Binnenwasserstände am Pegel Bedekaspeler Marsch, viertelstündlich,
- Niederschlagsbeobachtungen an der DWD Station Emden, täglich.

Für die Analyse von *Compound Events* in der Zukunft stehen zwei Modellläufe des regionalen Klimamodells MPI für die Szenarien RCP2.8 und RCP8.5 zur Verfügung, die in stündlicher Auflösung Klimainformationen bis zum Jahr 2100 enthalten. Die Bias-Korrektur wurde nach der Methode des Quantile-Mapping durchgeführt. Für diese Studie wurde zunächst das

RCP8.5 ausgewählt, um potenzielle Auswirkungen einer pessimistischen Klimaentwicklung zu illustrieren. Als weiter Datensatz stehen vom Helmholtz-Zentrum Hereon mit dem Modell TRIM (*Tidal Residual and Intertidal Mudflat*) simulierte Außenwasserstände für das RCP8.5 zur Verfügung. In dieser Simulation wurden aus den stündlichen Windfeldern des MPI-Modells stündlich aufgelöste Außenwasserstände für den Pegel Knock berechnet und die resultierend Ganglinie bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit dem 50. Perzentil der Simulationen des Meeresspiegelanstiegs des RCP8.5 überlagert (IPCC, 2021). Damit steht für die Auswertung der Szenarien erstmalig ein zeitlich hoch aufgelöster Langzeit-Datensatz konsistenter Szenariokombinationen von Klimadaten und Außenwasserständen zur Verfügung, der auch für die Kopplung von Wasserbilanzsimulationen und Entwässerungskapazitäten zur Quantifizierung der Systemüberlastung genutzt werden kann.

2.4 Modellansatz

Die zeitlich hochaufgelöste Klimasimulation des MPI Modells bildet sowohl den Antrieb der Wasserbilanzmodellierung mit dem physikalischen 1-D Modell SIMULAT (Diekkrüger und Arning, 1995; Bormann, 2008) als auch für die von Hereon auf Basis des TRIM Modells gelieferten Außenwasserstände. Während die Wasserbilanzsimulationen eine gute Abschätzung für den aktuellen und zukünftigen Entwässerungsbedarf darstellen (Modellvalidierung siehe Bormann et al., 2018), kann auf Basis der Außenwasserstände an der Knock und der Pumpenkennlinien des Schöpfwerks die Entwässerungskapazität zeitlich hoch aufgelöst bestimmt werden. Die simulierte Abflussbildung wird anschließend in täglichem Zeitschritt für den Szenario-Zeitraum bis 2100 mit der Entwässerungskapazität abgeglichen. Sobald die Abflussbildung in einem Zeitschritt über der Entwässerungskapazität liegt, tritt eine Überlastung des Systems auf. Diese besteht (und akkumuliert sich ggfs.) solange, bis der Wasserüberschuss durch die Entwässerungskapazität der folgenden Zeitschritte wieder abgebaut ist. Aus der resultierenden Zeitreihe der Überlastung können die Überlastungsereignisse mit ihrer spezifischen Dauer und ihrer maximalen Systemüberlastung (Volumen) extrahiert werden (Abb. 2: Ablaufschema).

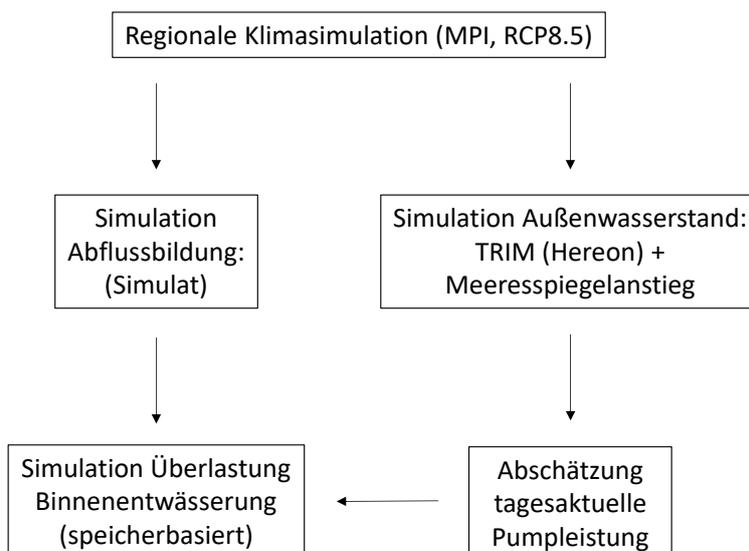


Abb. 2: Ablaufschema der Modellierung zur Abschätzung der Überlastung des Entwässerungssystems.

3. Analyse von *Compound Events*

3.1 Datenanalyse historischer Ereignisse

Zur Analyse der *Compound Events* in der historischen Zeitreihe werden entsprechend dem Ansatz von van den Hurk et al. (2015) die jeweils 15 größten unabhängigen Ereignisse in den verfügbaren Zeitreihen (2000-2019) in Bezug auf die folgende Variablen extrahiert:

- Die höchsten Außenwasserstände (3-Tages-Maximum am Pegel Knock über 3 Tage),
- Die höchsten Niederschläge (Summe über 3 Tage an der Wetterstation Emden), und
- Die höchsten gemessenen Binnenwasserstände (max. Wasserstand) am Pegel Bedekaspeler Marsch.

Trägt man die ausgewählten Ereignisse gegeneinander auf, wird deutlich, dass es zwischen diesen drei Datenkollektiven kaum Überlappungen gibt (Abb. 3). Die höchsten Binnenwasserstände treten in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von van den Hurk et al. (2015) für die Niederlande in der Regel nicht bei den höchsten Außenwasserständen oder Niederschlagssummen auf, sondern dann, wenn beide Ereignisse zumindest in einem moderaten Ausmaß zusammenfallen. So wurden zwar die höchsten Niederschlagsmengen in den Sommermonaten gemessen, führten aber aufgrund der moderaten Vorfeuchte und der ausreichenden Entwässerungskapazität nicht zu stark erhöhten Binnenwasserständen.

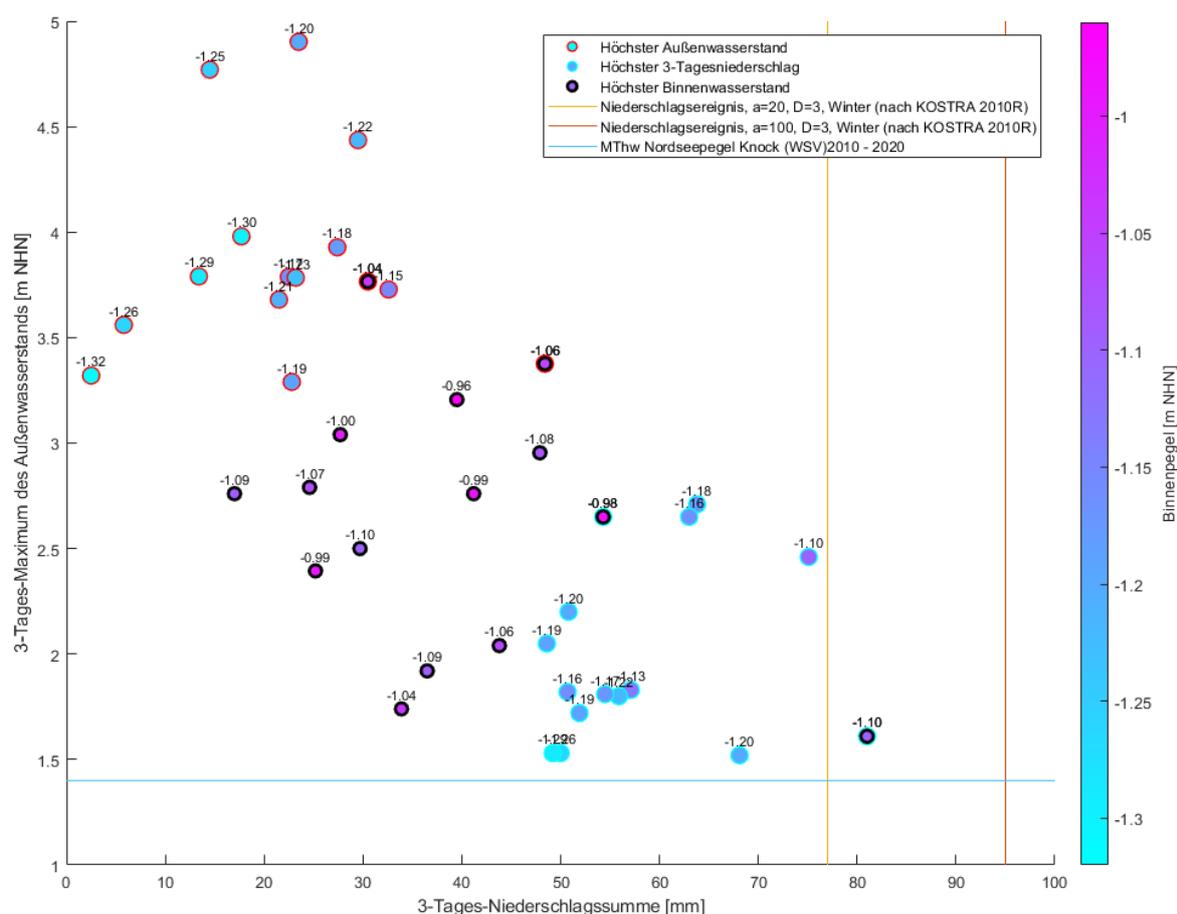


Abb. 3: Beobachtete *Compound Events* in der Zeitreihe 2000 bis 2019. Jeweils 15 maximale Ereignisse bzgl. Außenwasserstand (3 Tages-Maximum), Niederschlag (Summe über 3 Tage), max. Binnenwasserstand an einem der Tage (Angabe in [m] NHN).

3.2 Auswertung der Szenariosimulationen

Basierend auf dem Verständnis der Entstehung der historischen Ereignisse auf Basis des RCP8.5 Szenarios des MPI Modells werden zunächst die Auswirkungen des Klimawandels auf die Treiber der *Compound Events* untersucht. Die beitragenden Prozesse werden dabei separat betrachtet. Die Analyse der Leistungsfähigkeit des Schöpfwerks Knock ergibt, dass ein Meeresspiegelanstieg von ca. 1 m bis Ende des Jahrhunderts bereits zu einer erheblichen Abnahme der Pumpleistung des Schöpfwerks Knock führen wird (Abb. 4). Zwar ist nicht mit einer zunehmenden Sturmaktivität zu rechnen, jedoch wird die Förderleistung der Pumpen allein aufgrund des Meeresspiegelanstiegs (50. Perzentil des RCP8.5) von 57 m³/s auf rund 46 m³/s zurückgehen. Damit werden Häufigkeit und Intensität von Ereignissen zunehmen, die potenziell zu einer Überlastung der Binnenentwässerung beitragen.

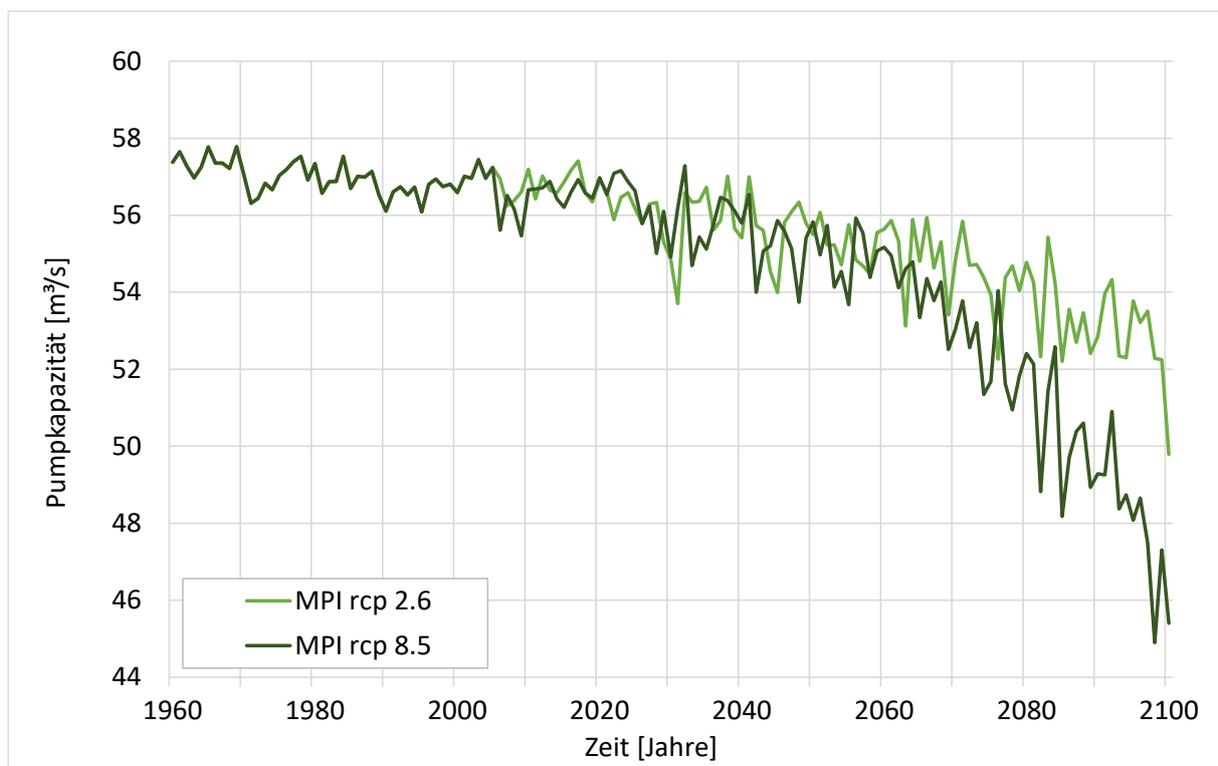


Abb. 4: Entwicklung der Pumpkapazität der Knock bei einem Meeresspiegelanstieg von ca. 1 m bis zum Jahr 2100.

Gleichzeitig kann in Übereinstimmung mit früheren Studien (Bormann et al., 2018, 2020) erwartet werden, dass auch die Abflussbildung im Winterhalbjahr signifikant zunehmen wird. Die mit dem Modell SIMULAT für das Szenario RCP8.5 (MPI-Modell) projizierte Abflussbildung im Winterhalbjahr liegt um über 30% über dem in den letzten 2 Jahrzehnten beobachteten Entwässerungsbedarf (Abb. 5) und über den in früheren Projekten quantifizierten Klimafolgen. Lediglich in den Sommermonaten ist mit einem leichten Rückgang der Abflussbildung zu rechnen. Da im verwendeten Szenario auch die Anzahl der Starkregentage bis Ende des Jahrhunderts zunimmt, kann auch hier von häufigeren und intensiveren Systemüberlastungen im Rahmen von *Compound Events* ausgegangen werden.

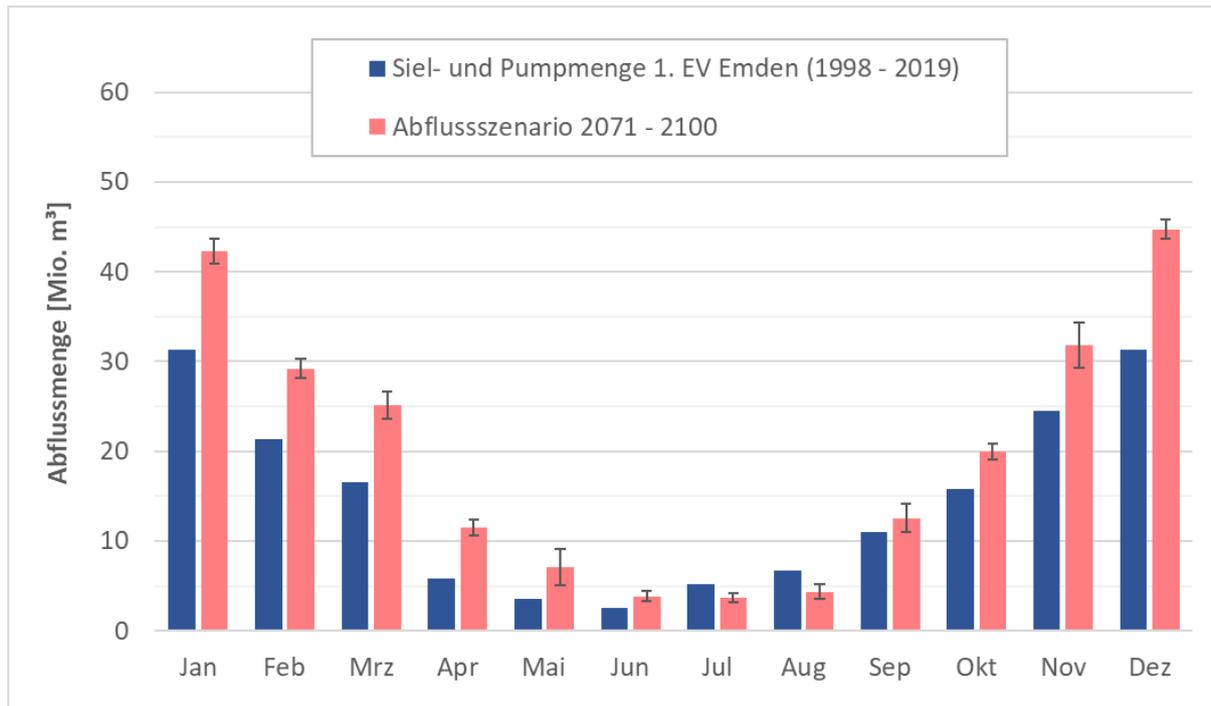


Abb. 5: Veränderung der saisonalen Abflussbildung, simuliert für das Verbandsgebiet des 1. EVE für den Zeitraum 2071-2100 (MPI, RCP8.5) im Vergleich zu den Beobachtungen.

Analysiert man nun – ähnlich wie für die Beobachtungen – die jeweils 15 größten Ereignisse der Niederschlagssumme über 3 Tage, der höchsten mittleren Außenwasserstände über 3 Tage und der größten Überlastungsereignisse aus der Kontrollperiode des MPI-Modells (RCP8.5, 1971-2000), ergibt sich für das Überlastungsvolumen der simulierten Überlastungsereignisse (Abb. 6) die gleiche Systematik wie für die beobachteten Wasserstände der *Compound Events* (Abb.3). Auch bei der Simulation der Kontrollperiode treten zwischen den drei Datenkollektiven (höchste Außenwasserstände, Niederschläge, Systemüberlastungen) kaum Überlappungen auf. Individuelle Extremereignisse (Niederschlag oder Sturmflut) führen nur im Einzelfall zu einer Überlastung der Binnenentwässerung. Relevante Systemüberlastungen treten überwiegend dann auf, wenn mehrere moderate Ereignisse (Niederschlag und Sturmflut) als *Compound Event* zusammenwirken (Abb. 6).

Für die ferne Zukunft (2071-2100) führt die gleiche Analyse zu einer deutlichen Intensivierung der jeweils 15 größten Ereignisse. Sowohl die Einzelereignisse (Niederschlag, Sturmflut) als auch die *Compound Events* können mit einer größeren Intensität erwartet werden (Abb. 7). Während die Sturmfluten im betrachteten Szenario (RCP8.5 Szenario des MPI-Modells) mit etwa 1 m höheren Außenwasserständen auflaufen werden, treten auch deutlich ergiebigere Niederschläge auf (bis zu 190 mm über 3 Tage). Aufgrund der zunehmend extremen Klimabedingungen werden auch Einzelereignisse zu moderaten Systemüberlastungen führen, ggfs. auch in Jahreszeiten, für denen bisher ein geringeres Überflutungsrisiko angenommen wurde. Allerdings werden auch in der fernen Zukunft die größten Systemüberlastungen v.a. als Kombination beider beitragenden Wirkungen (Niederschlag und hoher Außenwasserstand) und damit als *Compound Events* auftreten. Die Überlappung der drei Datenkollektive bleibt gering.

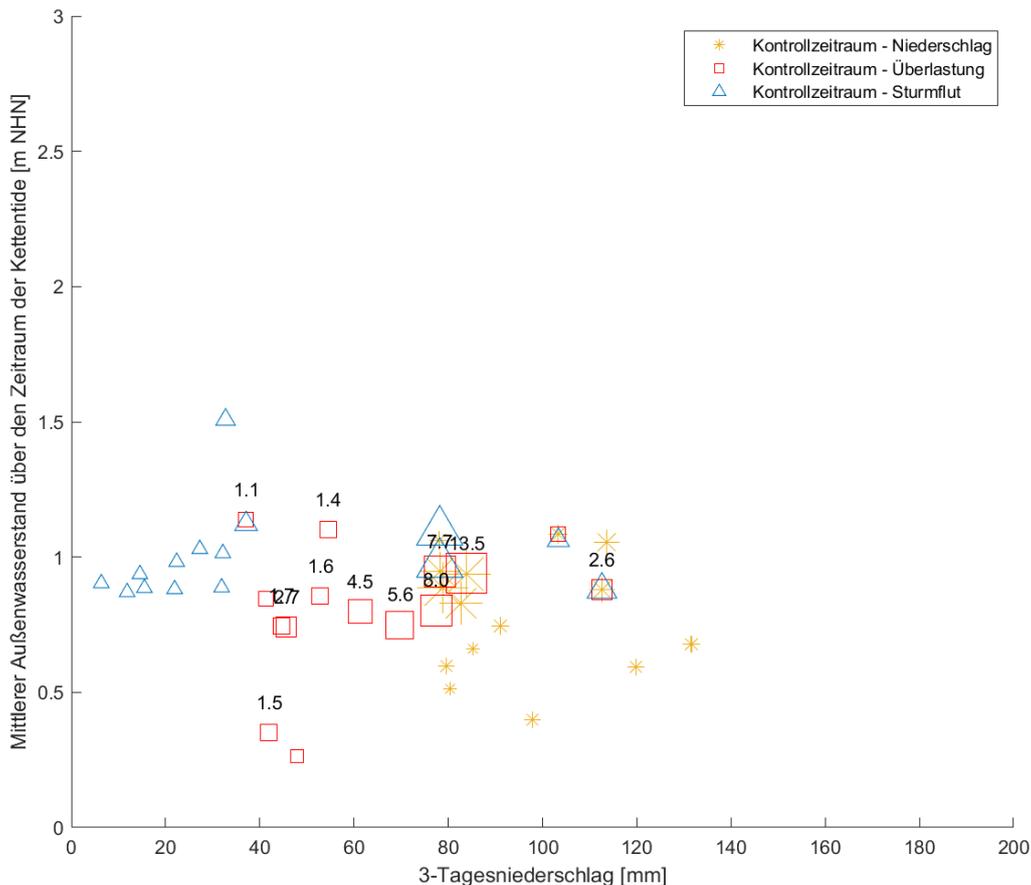


Abb. 6: Simulierte *Compound Events* in der Kontrollperiode (1971-2000) des MPI Modells, Szenario RCP8.5. Jeweils 15 maximale Ereignisse bzgl. Außenwasserstand (Mittelwert über 3 Tage; blaue Dreiecke), Niederschlagssumme über 3 Tage (gelbe Sterne), max. Systemüberlastung des Ereignisses [Mio m³] (rote Quadrate).

Die Auswertung der verschiedenen Zeitscheiben der Szenariosimulationen zeigt schließlich, dass die intensivsten Ereignisse und die größten Überlastungen für das betrachtete Szenario RCP8.5 vor allem gegen Ende des Jahrhunderts zu erwarten sein werden.

4. Diskussion

Die Analyse historischer Binnenhochwasserereignisse an der Deutschen Nordseeküste ergibt in Bezug auf die eingangs genannte Klassifikation von Zscheischler et al. (2020), dass in der Vergangenheit vor allem Sturmtiefserien (zeitliche *Compound Events*) in Kombination mit großräumigen, ergiebigen Niederschlägen zu einer Überlastung der Binnenentwässerung geführt haben (Multivariate *Compound Events*), die sich in den Küstenniederungen v.a. durch erhöhte Binnenwasserstände und damit verbundene Ausuferungen der Gewässer geäußert hat. Besonders starke Überlastungen traten dann auf, wenn die Böden aufgrund einer langanhaltend nassen Wetterlage bereits wassergesättigt waren (*preconditioned Compound Events*). Das entspricht im Winter dem Regelfall.

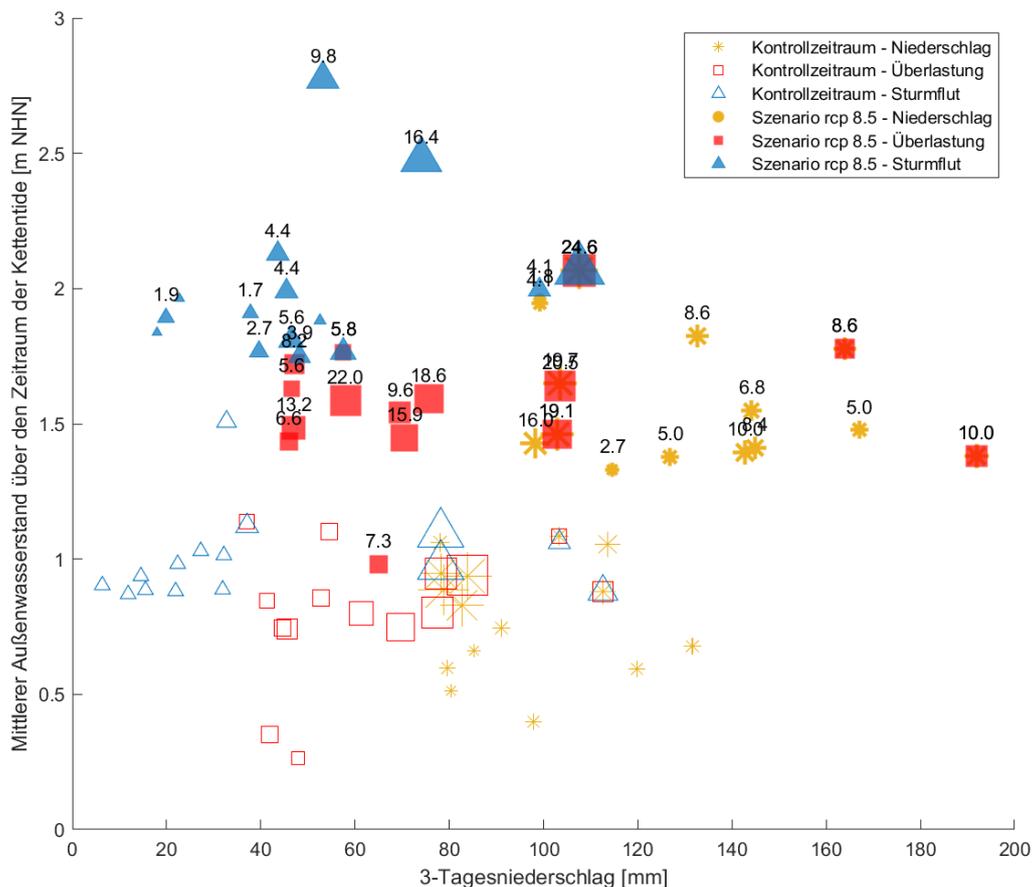


Abb. 7: Simulierte *Compound Events* in der Kontrollperiode (1971-2000) und der fernen Zukunft (2071-2100; ausgefüllte Symbole) des MPI Modells (RCP8.5). Jeweils 15 maximale Ereignisse bzgl. Außenwasserstand (Mittelwert über 3 Tage; blaue Dreiecke), Niederschlagssumme über 3 Tage (gelbe Sterne), max. Systemüberlastung des Ereignisses (rote Quadrate).

Entsprechend der Typologie nach Zscheischler et al. (2020) ergeben sich die größten Herausforderungen für die Binnenentwässerung bei einer Kombination verschiedener Typen von *Compound Events*. Weder eine kurze Sturmflut noch ein Starkniederschlagsereignis allein stellt für die Binnenentwässerung eine große Herausforderung dar. Aufgrund der begrenzten Datenlage sind differenzierte Analysen der einzelnen beitragenden Effekte zwar nicht bis ins Detail möglich, aber die Ähnlichkeit der Ergebnisse der Beobachtungen und der Kontrollperiode zeigt, dass sich *Compound Events* an der Deutschen Nordseeküste mit der Modellkette realistisch abbilden lassen. Die Anwendung der Modellkette auf zukünftige Klimabedingungen ermöglicht eine quantitative Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirkung der *Compound Events*. Daraus ergibt sich ein Mehrwert für die Klimawandelanpassung der Wasserwirtschaft im Küstenraum, die möglichst konkrete Werte für eine klimaangepasste Bemessung von Anlagen benötigt. Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit, Binnenhochwassergefahrenkarten (Bormann et al., 2022) und potenzielle Folgen von Systemüberlastungen (=Überflutungen) zu quantifizieren und damit das Risikomanagement zu unterstützen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analyse historischer wie zukünftiger Binnenhochwasserereignisse an der Deutschen Nordseeküste zeigt, dass vor allem das Zusammentreffen von verschiedenen Wirkungen (*Compound Events*) zu Herausforderungen des Entwässerungsmanagements der Küstenniederungen führt. Die vorgestellte Modellkette ist in der Lage, die Beobachtungen der Vergangenheit abzubilden und potenzielle Klimawandelfolgen in Projektionen zu quantifizieren. Bisher wurde erst ein hochaufgelöstes Klimamodell in diese Analyse einbezogen. Es ist zu prüfen, inwieweit sich die Ergebnisse bei Verwendung weiterer Klimamodelle und Klimaszenarien bestätigen und verallgemeinern lassen.

Danksagung

Das Projekt „WAKOS: Wasser an den Küsten Ostfrieslands“ wird vom BMBF im Rahmenprogramm "Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)" innerhalb der Fördermaßnahme RegKlim (Regionale Informationen zum Klimahandeln) gefördert.

Literatur

- Bormann, H., 2008. Sensitivity of a regionally applied soil vegetation atmosphere transfer scheme to input data resolution and data classification. *Journal of Hydrology* 351, 154-169.
- Bormann, H., Keschull, J., Ahlhorn, F., 2020. Challenges of Flood Risk Management at the German Coast, in: Negm, A.M., Zelenakova, M., Kubiak-Wojcicka, K. (Eds.), *Water Resources Quality and Management in Baltic Sea Countries*. Springer Water. S. 141-155.
- Bormann, H., Keschull, J., Ahlhorn, F., Spiekermann, J., Schaal, P., 2018. Modellbasierte Szenarioanalyse zur Anpassung des Entwässerungsmanagements im nordwestdeutschen Küstenraum. *Wasser und Abfall* 20(7/8), 60-66.
- Bormann, H., Keschull, J., Spiekermann, J., Kramer, N., 2022. Eine Methodik zur Ableitung szenariobasierter Binnenhochwassergefahren- und -risikokarten im nordwestdeutschen Küstenraum. *Wasser und Abfall* 24(6), 14-20.
- Dieckrüger, B., Arning, M., 1995. Simulation of water fluxes using different methods for estimating soil parameters. *Ecological Modelling* 81 (1-3), 83-95, 1995.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2391 S.
- van den Hurk, B., van Meijgaard, E., de Valk, P., van Heeringen, K.-J., Gooijer, J., 2015. Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters* 10, 035001.
- Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R.M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M.D., Maraun, D., Ramos, A.M., Ridder, N.N., Thiery, W., Vignotto, E., 2020. A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 333-347.

Wege zu einer integralen Bewertung von Hochwasser- und Starkregengefahren

Christoph Mudersbach, Oliver Buchholz, Holger Hoppe

Zusammenfassung

Ein zentrales Element im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement ist die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten. Während für die Bewertung von Hochwassergefahren an Fließgewässern bundesweit Regelungen vorliegen, ist dies bei Starkregengefahren nicht gegeben. Ebenso gibt es für eine erforderliche integrale Betrachtung der Hochwasser- und Starkregengefahren Wissens- und Regelungslücken. Die identifizierten Defizite sollen im Rahmen einer DWA-Arbeitsgruppe ES-2.8 „Integrale Starkregen- und Hochwassergefahrenkarten“, die als gemeinsame Arbeitsgruppe der Fachausschüsse HW-4 „Hochwasserrisikomanagement“ und ES-2 „Systembezogene Planung“ eingerichtet wurde, bearbeitet werden. Erste Ergebnisse der Arbeitsgruppe werden vorgestellt.

1. Einführung

Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Teilen von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen hat die Dringlichkeit von gezielter, ortsbezogener Vorsorge zum Schutz vor Hochwasser und Starkregenüberflutungen nachdrücklich unterstrichen. Ein zentrales Element im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement ist die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten. Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung nimmt darauf unmittelbar Bezug: „Wir schaffen bundeseinheitliche Standards für die Bewertung von Hochwasser- und Starkregenrisiken und die Erstellung und Veröffentlichung von Gefahren- und Risikokarten“ (Bundesregierung, 2021).

Während für die Bewertung von Hochwassergefahren an Fließgewässern (fluviale Überflutungen) durch die Einführung der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie im Jahr 2007 und den nachfolgenden rechtlichen Regelungen und Arbeitshilfen (z.B. LAWA 2018a, 2018b) weitgehend bundeseinheitliche Regelungen vorliegen, ist dies bei Starkregengefahren (pluviale Überflutungen) nicht gegeben. Zwar existieren Leitfäden und Regelwerke für die Erstellung von Starkregengefahrenkarten (z.B. LUBW 2016, MULNV 2018, WHG 2009), aber weder für die Starkregengefahrenkarten noch für eine erforderliche integrale Betrachtung der Gefahren aus Hochwasser und Starkregen liegen einheitliche Standards vor. Dies betrifft sowohl die technischen Aspekte einer integralen Analyse der Überflutungsgefährdung, als auch gesetzliche und administrative Vorgaben bzw. Zuständigkeiten. Eine systematische Darstellung Zusammenhänge fand erstmals im Werkstattbericht des HKC (2021) statt. Hinweise zu Modellsätzen zu Überflutungsbetrachtung in unterschiedlichen Skalen für den urbanen Raum finden sich auch in HSB (2017).

Die identifizierten Defizite sollen im Rahmen einer DWA-Arbeitsgruppe ES-2.8 „Integrale Starkregen- und Hochwassergefahrenkarten“, die als gemeinsame Arbeitsgruppe der Fachausschüsse HW-4 „Hochwasserrisikomanagement“ und ES-2 „Systembezogene Planung“ eingerichtet wurde, bearbeitet werden.

2. Beispiel für Überlagerung von Starkregen- und Hochwassergefahren

Bisherige verfügbare Hochwassergefahrenkarten und Starkregengefahrenkarten erlauben bzw. erfordern in Teilbereichen eine integrale Betrachtung und Bewertung der Modellergebnisse. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für die aus dem Rheinisch-Bergischen-Kreis (NRW). Es liegen sowohl Hochwassergefahrenkarten als auch Starkregengefahrenkarten vor. Die Starkregengefahrenkarte zeigt sowohl abseits als auch in der Nähe des Gewässers Überflutungen infolge eines 100-jährlichen Starkniederschlagsereignisses. Die Hochwassergefahrenkarte für das HQ100 weist die Überschwemmungsbereiche durch das 100-jährliche Hochwasserereignis aus. Es zeigt sich, dass es insbesondere in Gewässernähe zu einer starken Überlappung der dargestellten überfluteten Bereiche kommt. Allerdings muss beachtet werden, dass das 100-jährliche Starkniederschlagsereignis nicht primär ursächlich für das 100-jährliche Hochwasserereignis in dem Gewässer sein muss.

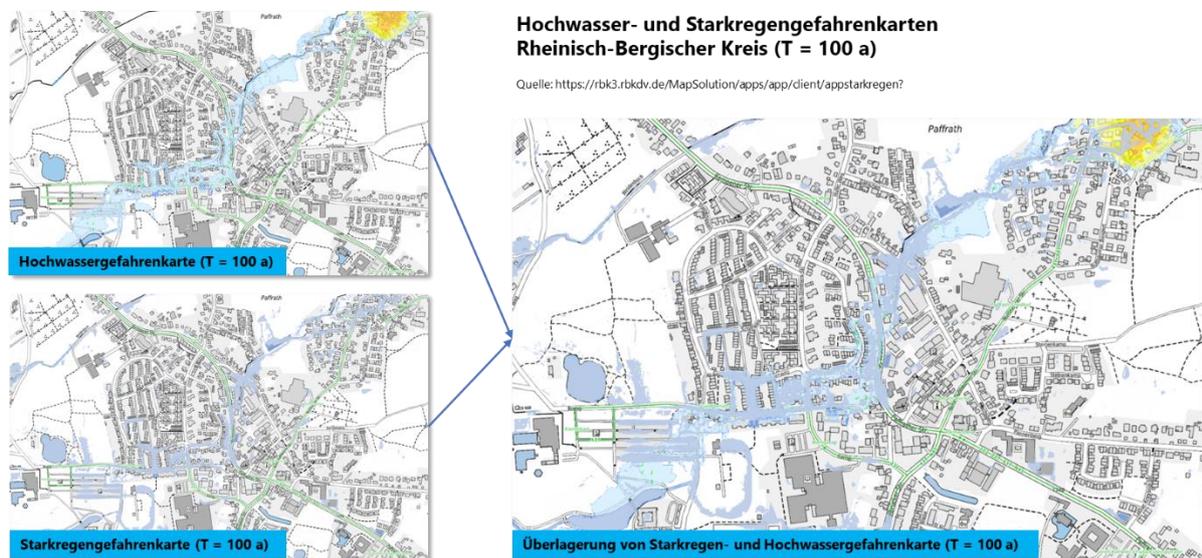
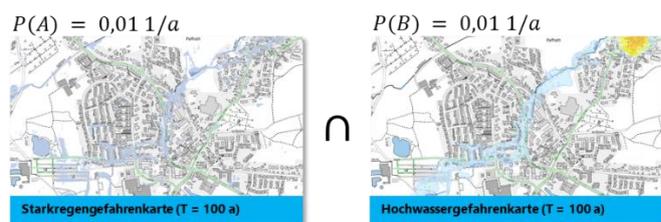


Abb. 1: Vergleich und Überlagerung von Starkregenhinweiskarte und Hochwassergefahrenkarte.

Die kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeit aus Überflutung durch Starkniederschlag und Überschwemmung durch Flusshochwasser hängt davon ab, ob die Ereignisse Starkregen und Hochwasser statistisch unabhängig sind oder nicht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Überlagerung von Hochwasser- und Starkregengefahrenkarten des Szenarios T = 100 Jahre kann somit zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren (statistisch vollständig abhängige Ereignisse) oder aber bis zu einer Jährlichkeit von 10.000 Jahren (statistisch vollständig unabhängige Ereignisse) führen (Abbildung 2). Dies ist bei der Bewertung der unterschiedlichen Ergebnisse zu beachten, ebenso wie die Tatsache, dass mögliche hydraulische Wechselwirkungen bei einer einfachen „Überlagerung“ nicht berücksichtigt werden können. Empfehlungen zur Angabe von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten existieren derzeit aber nicht.



Unabhängige Ereignisse:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) = 0,0001 \text{ 1/a}$$

Abhängige Ereignisse:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A) = ?$$

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A|B) = ?$$

Abb. 2: Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für das gemeinsame Auftreten von Hochwasser- und Starkregenereignissen.

3. Zukünftiger Handlungsbedarf

Für eine integrale Bewertung von Starkregen- und Hochwassergefahren sind insbesondere die nachfolgenden grundlegenden Aspekte bedeutend, die Gegenstand der zukünftigen Regelwerksarbeit sein sollen:

Die integrale Betrachtung von Starkregen- und Hochwassergefahren wird bislang durch kein Regelwerk umfassend beschrieben, obwohl Hochwasserschäden oftmals aus einer Kombination von beiden Ereignissen entstehen. Gerade für Betroffene und Entscheidungsträger ist die bisherige Trennung von Starkregengefahren und Hochwassergefahren eine Herausforderung, da letztlich das Risiko von negativen Auswirkungen hydrologischer Extremereignisse gemindert werden soll, unabhängig von deren physikalischer Entstehung.

Eine integrale Betrachtung von Starkregen- und Hochwassergefahren ist daher unerlässlich, kann jedoch nicht gleichermaßen für alle Gebiete einheitlich erfolgen. Ein wesentlicher Parameter ist das Verhältnis aus der Flächengröße des betrachteten Untersuchungsgebietes (A_U) zu dem zugehörigen hydrologischen bzw. hydrologisch relevanten Einzugsgebiet (A_E):

$$g = A_U/A_E$$

Liegt der Verhältniswert g nahe bei 1 (vgl. Fall A in Abbildung 3), dann kann die Überregnung des Untersuchungsgebietes A (Kopfgebiet) gleichzeitig zu einer flächigen Sturzflut und einem Hochwasserereignis im Gewässer führen. Eine modelltechnische Trennung der Berechnung und Darstellung eines solchen Ereignisses führt zu einem Informationsverlust, da der Zufluss durch die flächige Sturzflut zum Gewässer nicht abgebildet wird.

Im Fall B (Verhältniswert $g < 1$) kann durch einen Starkregen im Gebiet B eine flächige Sturzflut ausgelöst werden, die nicht zwingend zeitgleich mit einem Hochwasser im Gewässer stattfinden muss. Je nach Gebietsgröße muss jedoch auch mit einem signifikanten Hochwasserzufluss von oberhalb gerechnet werden, da ein zeitliches Zusammentreffen beider Ereignisse möglich ist. Länger anhaltende Niederschlagsereignisse geringerer Intensitäten können auch zu Hochwasserzuflüssen im Gewässer führen, ohne dass eine gleichzeitige Sturzflut stattfindet. Eine modelltechnische Abbildung des gesamten Einzugsgebietes einschließlich des gesamten Gewässermodells je nach Gebietsgröße und verfügbaren Grundlagen entsprechend aufwändig, weshalb auch eine statistische Kopplung von Starkregengefahren und Hochwassergefahren in Erwägung gezogen werden kann. Hierzu müssen jedoch vorab die statistischen

Abhängigkeiten zwischen Starkregen und Hochwasser in dem betroffenen Gebiet mit geeigneten Verfahren analysiert werden. Hierzu können beispielsweise Copula-Funktionen genutzt werden (Bender et al., 2018).

Liegt der Verhältniswert g nahe bei 0 (vgl. Fall C), dann sind die Ereignisse Sturzflut im Gebiet C und Hochwasser im Hauptgewässer voneinander nahezu unabhängig, da die ereignisauslösenden Prozesse und Gebiete sehr unterschiedlich von Größe, Reaktionszeit und Überregung sind.

Insbesondere für die Fälle A und B gilt es eine Methodik zu entwickeln, welche die Überflutungs- und Überschwemmungsprozesse physikalisch und/oder statistisch kombiniert und holistisch abbildet.

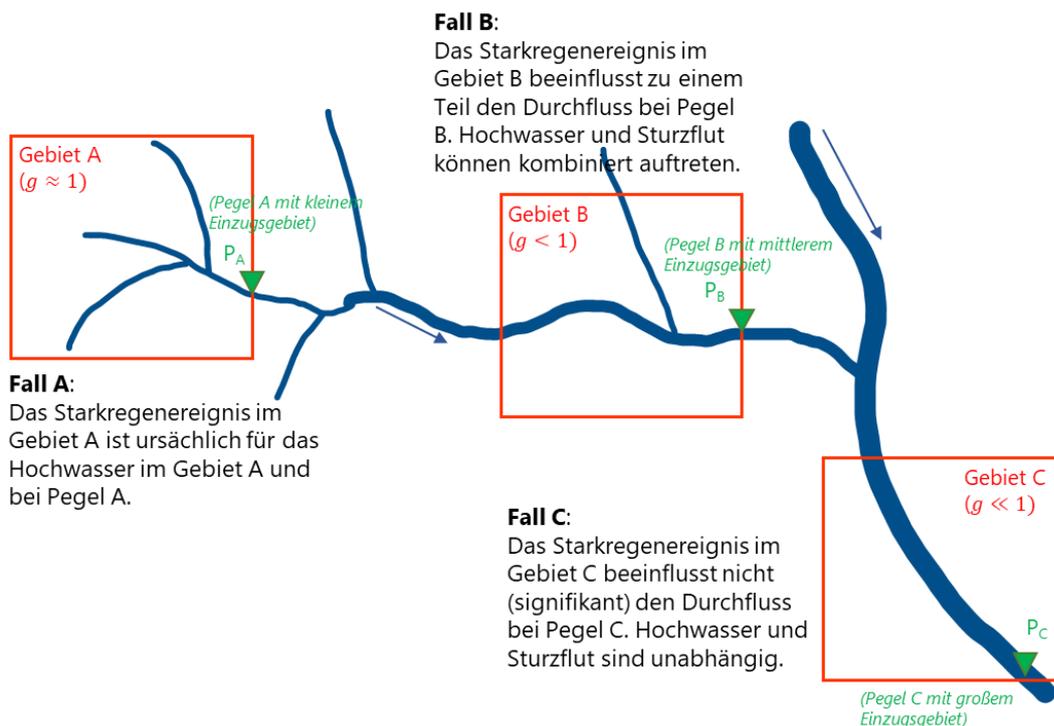


Abb. 3: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Starkregenereignis und Durchfluss im Gewässer

Eine Herausforderung bei der zukünftigen Arbeit der DWA-AG ES-2.8 wird sein, dass für einige skizzierten Problemstellungen derzeit noch keine ausreichenden wissenschaftlichen Grundlagen vorliegen, die es erlauben würden, diese in den Stand der Technik zu überführen. Die DWA-AG ES-2.8 selbst kann diese wissenschaftlichen Grundlagen nicht erarbeiten. Aus diesem Grund möchte die DWA-AG ES-2.8 auch Ansporn sein, entsprechende Forschungsvorhaben zu initiieren, um vorhandene Wissenslücken schließen zu können.

Literatur

- Bender, J.; Jensen, J.; Mudersbach, C.; Klein, B.; Rothe, B. (2018): Multivariate Wahrscheinlichkeiten: ein Mehrgewinn – nicht nur für die Wissenschaft. In: KW – Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (3), S. 160–165. DOI: 10.3243/kwe2018.03.005.
- Bundesregierung (2021): Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP) <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/koalitionsvertrag-2021-1990800> (14.03.2023).
- HKC (2021): Umgang mit hydrologischen Belastungsgrößen in Zeiten des Klimawandels - Hochwasser und Starkregen, HKC Werkstattbericht 2021: Hrsg. HochwasserKompetenz-Centrum e. V., Köln (HKC) <https://hkc-online.de/de/Projekte/HKC-Werkstattbericht> (14.03.2023).
- HSB (2017): Praxisleitfaden – Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Hochschule Bremen. https://www.klas-bremen.de/sixcms/media.php/13/KLAS_Praxisleitfaden_DIN_A4.12560.pdf (14.03.2023).
- LAWA (2018a): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten; Hrsg.: Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz; Mainz.
- LAWA (2018b): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement; Hrsg.: Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz; Erfurt.
- LUBW (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg; Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; KarlsruheManiak, U., 2005. Hydrologie und Wasserwirtschaft, 5., bearb. u. erw. Aufl., Berlin.
- MULNV (2018): Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement – Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW; Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen; Düsseldorf.
- WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237); https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/ (14.03.2023).

Trockenheit im Stresstest: Modellexperimente für Niedrigwasser und Quellschüttungen in Baden-Württemberg

Kerstin Stahl, Jost Hellwig, Michael Stölzle

Zusammenfassung

Die Trockenheit der vergangenen Jahre zeigte die Notwendigkeit auf, eine bessere Planungsgrundlage für konkurrierende Wassernutzungen und Schutzziele zu schaffen. Neben klassischen Bemessungsgrundlagen kommt hierfür hydrologischen Modellexperimenten eine wichtige Rolle zu. Solche Experimente untersuchen die Reaktion hydrologischer Systeme auf verschärfte Trockenheit. Zur Abschätzung der Sensitivität von Quellschüttungen und Basisabfluss gegenüber Trockenperioden in Baden-Württemberg wurden deshalb Simulationen mit Stresstestszenarien entwickelt und ausgewertet. Entscheidende Komponenten sind dabei die Grundwasserneubildung aus zwei verschiedenen Modellen, die Basisabflusseparation und die Kalibrierung verschiedener konzeptueller Grundwasserspeichermodelle. Hierbei zeigen sich für die 71 Quellen und 62 Einzugsgebiete zwar Tendenzen zu präferierten aber keine eindeutig beste Modellstruktur. Somit ist ein Ensemble Ansatz für die Experimente wichtig. Die GWN wird in unterschiedlichen Stärken und über unterschiedliche Dauern im Vorlauf von zurückliegenden Trockenjahren reduziert. Somit werden die Vorbedingungen von diesen bekannten Ereignissen im Stresstest weiter verschärft. Im Beispiel einer 50% Reduktion über 6 Monate vor dem Ereignis von 2018 zeigt sich, dass die Stresstests in den meisten Fällen deutliche Reduktionen von Niedrigwasser verursachen. Die Experimente bilden grobe naturräumlich systematisch unterschiedliche Sensitivitäten in Baden-Württemberg ab. Dabei zeigt sich jedoch die Bedeutung einer spezifisch angepassten Modellarchitektur sowie der Abschätzung von Modell-bedingten Unsicherheiten. In Zukunft potentiell weiter verstärkte Effekte von Trockenheit werden durch die Anwendung auf konkrete bekannte Ereignisse wie die Niedrigwasserphase im Jahr 2018 mit den Stresstests so vorstellbar und kommunizierbar.

1. Einleitung

Vermehrte schwere Trockenperioden haben in den letzten Jahren in Deutschland immer wieder zu starkem Niedrigwasser und negativen Auswirkungen in verschiedenen Sektoren geführt. Dabei reagieren Einzugsgebiete regional sehr verschieden auf ausbleibenden Niederschlag, was in erster Linie auf ein unterschiedliches Verhalten der Abflusskomponenten zurückzuführen ist. In Trockenphasen versiegen die schnellen Abflusskomponenten und allein der verzögerte Abfluss aus Gebietsspeichern sorgt dafür, dass Oberflächengewässer nicht versiegen. Der wichtigste Speicher in Deutschland ist dabei das Grundwasser und die einzugsgebietsspezifischen hydrogeologischen Bedingungen bestimmen daher auch wesentlich die Abflussdynamik bei Trockenheit.

Im Zuge des Klimawandels wird das Sommerhalbjahr in Deutschland tendenziell trockener und heißer (Jacob et al., 2012). Auch längerfristige Niederschlagsdefizite, bei denen es im Winter nur in geringem Maße zur Wiederauffüllung der Speicher kommen kann, sind möglich und können für das hydrologische System großen Stress verursachen. Die hydrologische Reaktion der Oberflächengewässer auf derartige Ereignisse hängt wesentlich von der Beständigkeit des Grundwasserbasisabflusses ab. Für die Abschätzung dieser Größe im Falle schwererer Ereignisse als in der Vergangenheit reichen die Beobachtungen allein nicht aus. Studien greifen hierzu auf modellbasierte Szenarien und Experimente zurück, die begründete Prognosen und Unsicherheitsabschätzungen ermöglichen.

Ein Ansatz, mit dem die gebietsspezifische Reaktion auf Extremereignisses systematisch untersucht werden kann, sind Stresstests. Hierbei wird zunächst ein hydrologisches Modell ent-

wickelt, das geeignet ist, hydrologische Extreme zu simulieren, und mit Beobachtungen kalibriert. Anschließend wird der Modellantrieb (z.B. Niederschlag, Temperatur oder Grundwasserneubildung) systematisch verändert, so dass stärkere Extreme als in der Beobachtung auftreten. Die Reaktion der Modellausgabe auf verschiedene derartig veränderte Eingangsdaten lässt Rückschlüsse auf potenziell mögliche stärkere Extreme zu. Mithilfe solcher Stresstests konnte in der Vergangenheit bereits ein maßgeblicher Zusammenhang zwischen der Reaktion von Flüssen auf verstärkte Trockenheit und der Hydrogeologie im Einzugsgebiet festgestellt werden (Stoelzle et al., 2014). Ebenso ließ sich zeigen, dass der relevante Zeitraum der Vorbedingungen, also das „Gedächtnis“ der Einzugsgebiete, variiert und in kleinen Einzugsgebieten etwa maximal ein Jahr beträgt (Stoelzle et al., 2020b). Auch für das Grundwasser wurden Stresstests angewendet und dabei lokal sehr große Unterschiede in der Reaktion auf Trockenstress simuliert, die auch mit sehr verschiedenen Veränderungen infolge potentieller zukünftiger Klimaveränderungen einhergehen (Hellwig et al., 2021).

Die Erkenntnisse hinsichtlich der Sensitivität gegenüber Klimaveränderungen und Extremen, die mit den Stresstests gewonnen werden können, sind eine nützliche Grundlage für proaktive Anpassungsmaßnahmen an den Orten, an denen sie am dringendsten nötig sind. Aufgrund der regional großen Unterschiede ist hierfür allerdings eine flächenhafte Durchführung der Stresstests notwendig, die für die Oberflächengewässer bisher fehlt. In dieser Studie werden Stresstests für Quellen und Einzugsgebiete in ganz Baden-Württemberg präsentiert, um Muster hinsichtlich der Sensitivität gegenüber Trockenheitsextremen abzuleiten.

2. Methodik

2.1 Durchführung von Stresstests

Antriebsgröße für die durchgeführten Stresstests ist die Grundwasserneubildung (GWN). Im ersten Schritt werden sechs Grundwasser-Box-Modelle auf die Zielgröße Quellschüttung bzw. im Falle von Einzugsgebieten (EZG) auf den Basisabfluss (abgetrennt mit der Methode des „delayed flow index“, Stoelzle et al., 2020a) kalibriert. Die verschiedenen Modellstrukturen (Abbildung 1) repräsentieren Grundwassersysteme unterschiedlicher Charakteristik. Bei L1 handelt es sich um einen einfachen Einzellinearspeicher, LBY1 weist eine zusätzliche parallele Abflussmöglichkeit am Speicher vorbei auf. Die Modellstruktur MAT repräsentiert ein gekoppeltes Matrix-Poren-System, wie es beispielsweise in Karstgebieten vorzufinden ist. Bei PA2 erhalten zwei parallele Speicher mit unterschiedlichem Auslaufverhalten jeweils die Hälfte der GWN. Die Gruppe der Modellstrukturen LAY und LAYC bildet Gebietspeicher in mehreren Schichten ab, bei denen eine höhere Speicherfüllung zu überproportional höheren Auslaufzeiten führt.

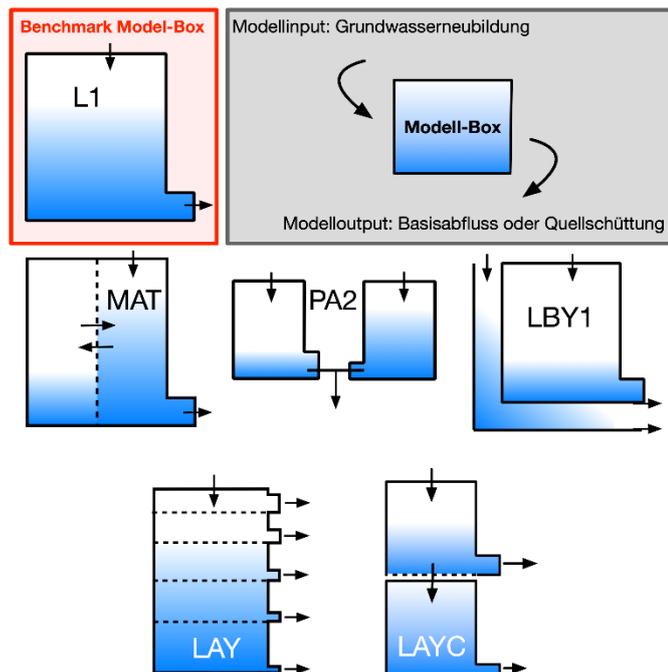


Abb. 1: Übersicht für die verwendeten Modellstrukturen (auch GW-Box-Modelle) für die kontinuierliche Translation von Grundwasserneubildung in Quellschüttung/Basisabfluss.

Die Modelle wurden mit einer zusammengesetzten Zielfunktion kalibriert. In diese gehen jeweils häftig die mittlere relative Abweichung und die logarithmierte Kling-Gupta-Effizienz ein. Um die Modelle insbesondere für die Simulation von Niedrigwasserphasen zu trainieren, wurden bei der Kalibrierung die quadrierten Abflussperzentile (d.h. 0 für Hoch- und 1 für Niedrigwasser) als Gewichtungsfaktor genutzt. Diejenige Modellstruktur, die die höchste Anpassung erreicht, wurde anschließend als EZG-spezifische optimale Modellstruktur weiterverwendet. Für die Stresstests wird die GWN über einen festgelegten Zeitraum systematisch verringert und der resultierende Modellabfluss mit dem Referenzabfluss aus der ursprünglichen Simulation verglichen (Abbildung 2). Die GWN wird in unterschiedlichen Stärken (25, 50, 75 und 100 Prozent) und über unterschiedliche Dauern (zwischen einem Monat und zwei Jahren) im Vorlauf von zurückliegenden Trockenjahren reduziert. Somit werden die Vorbedingungen von diesen bekannten Trockenperioden weiter verschärft. Hierdurch kann die zusätzlich mögliche Verschärfung einer bekannten hydrologischen Situation der Vergangenheit unter noch länger bzw. stärker trockenem klimatischen Verhältnissen beurteilt werden kann.

Grundsätzlich sinken die Abflüsse der Trockenperiode umso mehr, je länger der Zeitraum der Vorbedingungen ist, in dem die GWN reduziert wird. Ist jedoch die Länge des gebietsspezifischen Gedächtnisses erreicht, sinken die Abflüsse für verlängerte Stresstestdauern nicht mehr weiter ab. Es ergibt sich damit eine charakteristische Form der Abflussreaktion über der Stresstestdauer, aus der zwei gebietsspezifische Parameter abgeleitet werden können (Abbildung 2b). NQ_{\max} ist die maximal mögliche Reaktion des Gebiets auf einen Stresstest mit gegebener Reduktionsstärke. T_{\max} ist der Stresstest-Zeitraum, ab dem 90% des Wertes NQ_{\max} überschritten werden. Er beschreibt damit die Länge des Gedächtnisses im Gebiet.

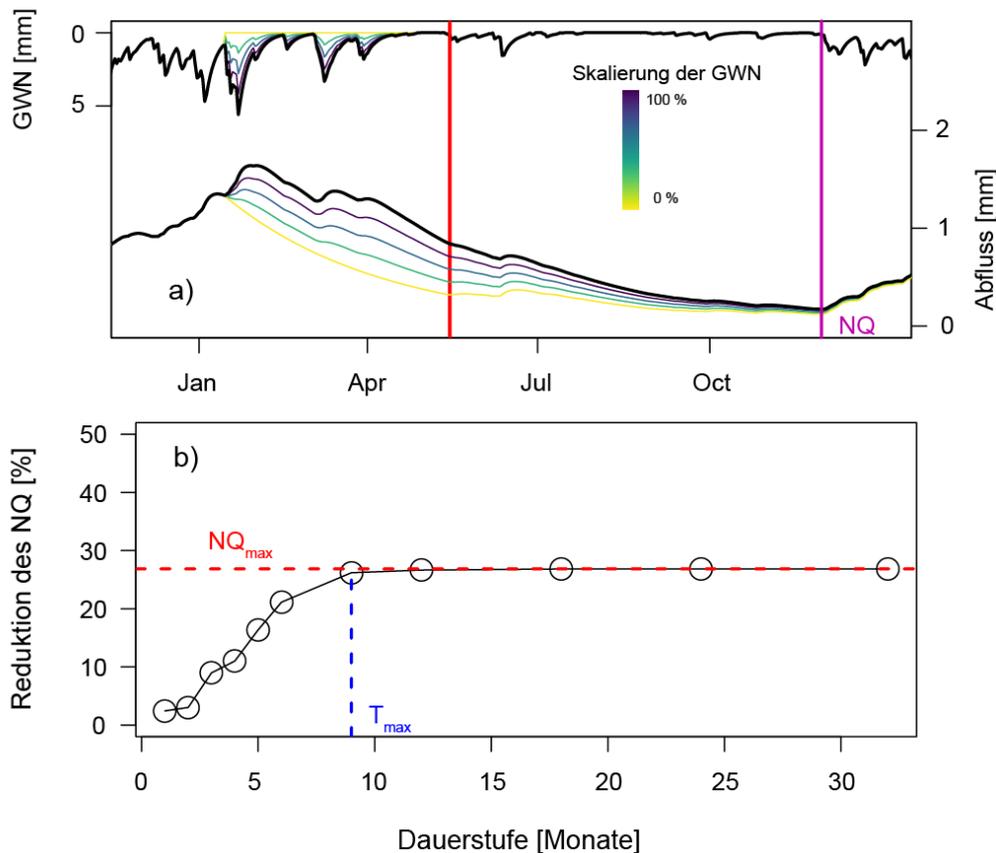


Abb. 2: Schematische Darstellung der Stresstests. a) Prozentuale Skalierung der Grundwasserneubildung im Beispielzeitraum von 4 Monaten vor dem Stichtag (=letzte Überschreitung des Q50 vor dem NQ) im Trockenjahr für die Durchführung der Stresstests. b) Beispiel für die Bestimmung von Auswertungsmetriken aus dem typischen Verlauf der Stresstestreaktion (hier: Reduktion des NQ) über dem Zeitraum der GWN-Reduktion im Stresstest.

Die charakteristischen Kurven aus Abbildung 2b lassen sich für jede Kombination von (Trocken-) Jahr und Reduktionsstärke erstellen, sehen aber grundsätzlich für jedes Gebiet immer ähnlich aus. Aus Gründen der Anschaulichkeit wird in dieser Studie beispielhaft ein Stresstest für das Trockenjahr 2018 verwendet, bei dem die GWN über variable Stresstestdauern um 50% reduziert wird. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Trockenjahre und Reduktionsstärken übertragen.

2.2 Anwendung für Quellen und Einzugsgebiete in Baden-Württemberg

Die Stresstests werden für 71 Quellen und 62 Pegel-einzugsgebiete in ganz Baden-Württemberg durchgeführt (Abbildung 3). Für alle Standorte liegen aus dem amtlichen Messnetz der LUBW mindestens für den Zeitraum von 2000 bis 2020 Messreihen in täglicher Auflösung vor, außerdem können die Dynamiken als jeweils nur gering anthropogen beeinflusst angesehen werden. Für alle Einzugsgebiete und Quellgebiete wurden mittels der Modelle GWN-BW (Armbruster 2002) und LARSIM (Bremicker, 2000) Sickerwasserraten als Grundwasserneubildungszeitreihen berechnet.

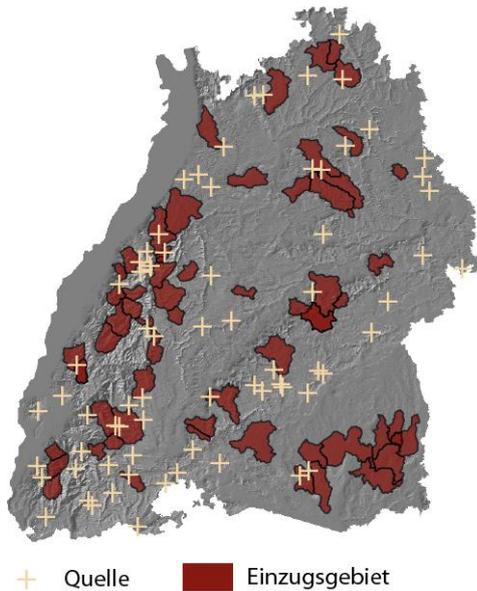


Abb. 3: Lage der verwendeten 71 Quellen und 62 Einzugsgebiete innerhalb Baden-Württembergs.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Kalibrierung und Unsicherheit

Innerhalb Baden-Württembergs kommen viele verschiedene optimale Modellstrukturen vor (Abbildung 4). Sowohl für die Grundwasserquellen, als auch für die Einzugsgebiete kommen die Modellstrukturen LAY, LAYC und PA2 zu ähnlichen Anteilen vor, während die Strukturen LBY1 und MAT nur vereinzelt zu beobachten sind. Die räumliche Verteilung der Modellstrukturen zeigt kein eindeutiges Muster auf, auch kleinräumig unterscheiden sich die Modellstrukturen durchaus. Auch wenn sich insgesamt die Anteile der einzelnen Modellstrukturen für die verschiedenen Eingangsdaten GWN-BW und LARSIM nicht maßgeblich unterscheiden, wird für jeweils fast 50% der Quellen und EZG für diese Eingangsdaten eine unterschiedliche optimale Modellstruktur bestimmt. Gerade für die Einzugsgebiete fällt allerdings auf, dass viele der Gebiete mit der optimalen Modellstruktur PA2 beim Modellantrieb GWN-BW die optimale Modellstruktur LAYC beim Modellantrieb LARSIM aufweisen.

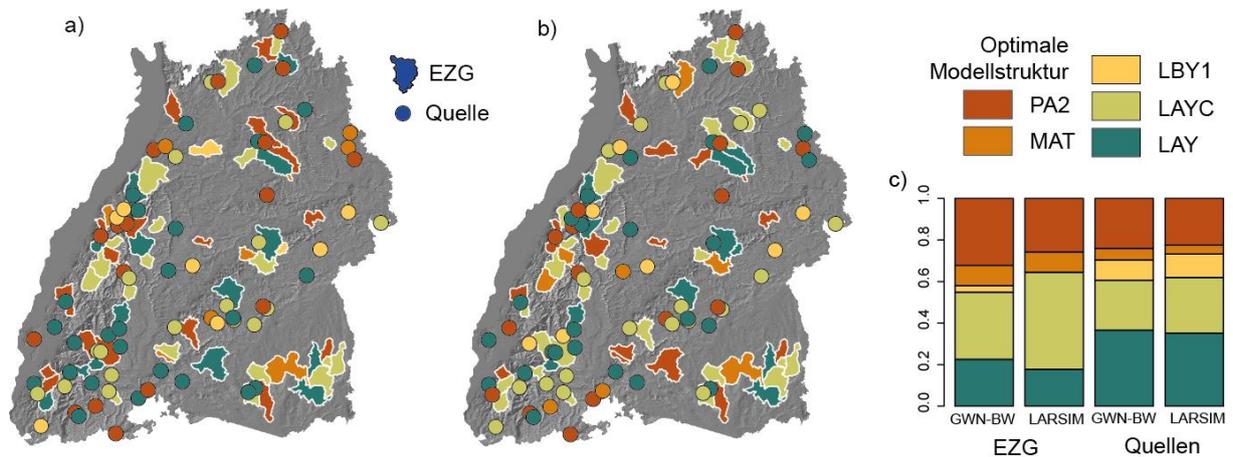


Abb. 4: Kalibrierte optimale Grundwasser-Modellstrukturen. a) Modellinput aus GWN-BW; b) Modellinput aus LARSIM; c) Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Modellboxen.

Die Modellstrukturen bestimmen wesentlich die Abflussdynamik und das Auslaufverhalten bei Niedrigwasser. Die hohe Unsicherheit bei der Wahl der Modellstruktur, die sich hier bereits durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Modellinputs zeigt, pflanzt sich in die Simulationen und Stresstestergebnisse fort. Gleichzeitig zeigt die große Diversität an optimalen Modellstrukturen innerhalb Baden-Württembergs auch die hohe Bedeutung, die der Wahl des Modells zukommt. Eine einheitliche, im Vorhinein festgelegte Modellstruktur wird der Heterogenität der Grundwasserbedingungen nicht gerecht. Dementsprechend scheitern (großskalige) hydrologische Modelle ohne lokal angepasste Grundwasser-Modell-Box regelmäßig bei der Abbildung lokaler Unterschiede im Niedrigwasserabfluss (Stahl et al., 2012). Gerade für die Abschätzung von Sensitivitäten gegenüber dem Klimawandel ist die korrekte Abbildung von Extremen aber besonders wichtig.

3.2 Potenzielle Extreme durch verstärkte Trockenheit

Die Stresstests zeigen, dass sich eine verstärkte Trockenheit in Form trockenerer Vorbedingungen nicht einheitlich auf die Niedrigwasserperiode durchschlägt. Für das Trockenjahr 2018 hätte eine zusätzliche Reduktion der Grundwasserneubildung um 50 % über einen Zeitraum von 6 Monaten in manchen Gebieten nahezu keine Auswirkung gehabt, während sich in anderen Gegenden der NQ entsprechend um knapp 50% halbiert hätte (Abbildung 5).

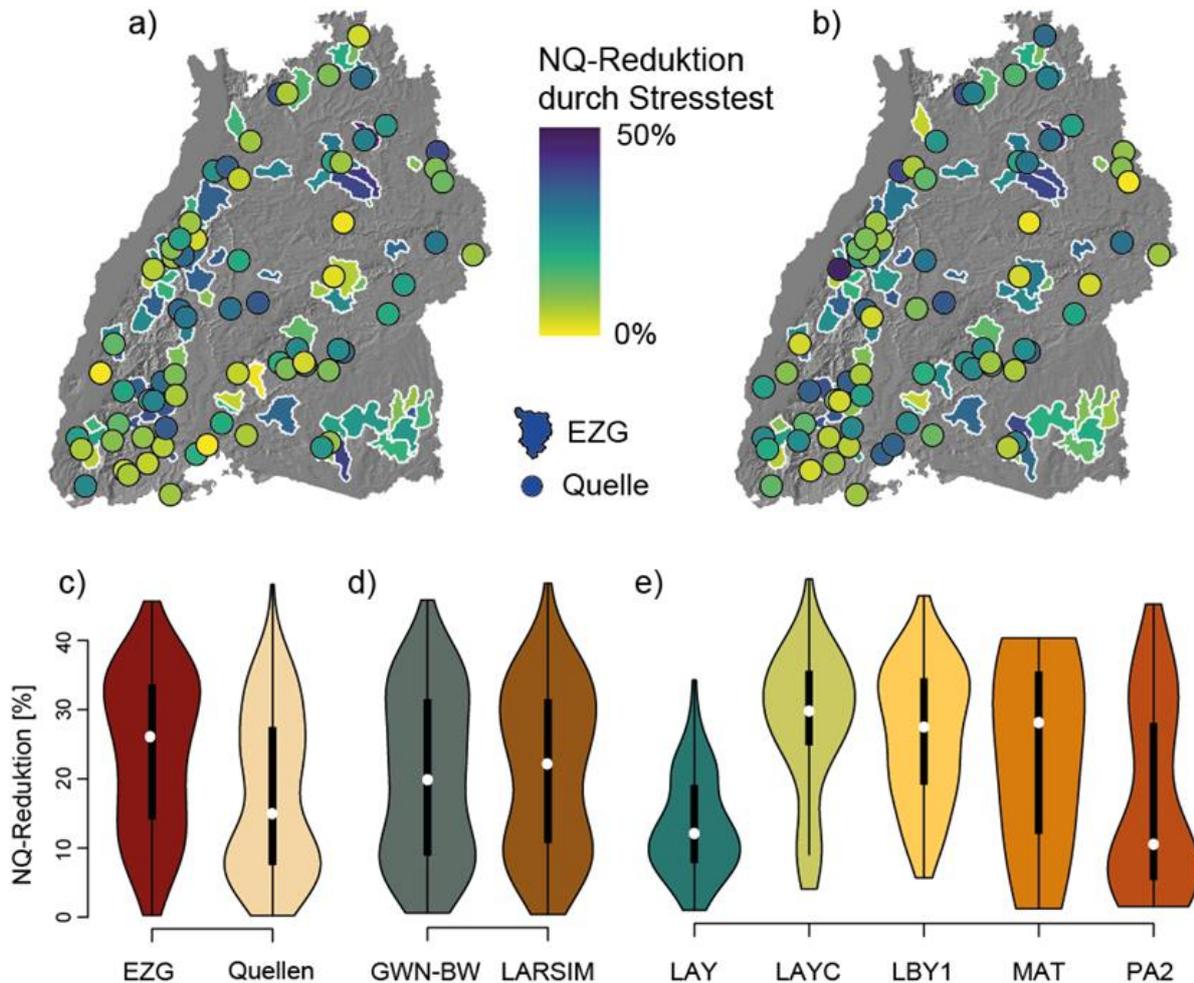


Abb. 5: Reduktion des NQ infolge eines Stresstests mit Reduktion der GWN in Höhe von 50% über einen Zeitraum von 6 Monaten. Räumliche Darstellungen mit dem Modellinput aus a) GWN-BW und b) LARSIM. Violinplots zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung der NQ-Reduktion für unterschiedliche Kategorien, unterschieden nach c) Art des Untersuchungsgebiets, d) Modellinput und e) Grundwasser-Modellstruktur.

Tendenziell sind die stärksten Reaktionen im Schwarzwald zu beobachten, insgesamt zeigt sich aber eine große und auch kleinräumige Heterogenität. Die räumlichen Muster sind dabei für die unterschiedlichen Inputs GWN-BW und LARSIM generell ähnlich (Korrelation $R=0.46$), können für einzelne Gebiete jedoch auch erheblich abweichen.

In den Ergebnissen zeigt sich, dass Quellen häufiger eine deutlich geringere Reduktion aufweisen als die Einzugsgebiete, d.h. weniger anfälliger für trockenere Vorbedingungen sind (Abbildung 5c). Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass viele (gefasste und beobachtete) Quellen ein Gebiet mit hohem dynamischem Speicher, der nur sehr langsam entleert, entwässern, während die Oberflächengewässer über die gesamte Länge des Gewässernetzes sehr abhängig von der Interaktion mit dem Grundwasser sind. Am Schwarzwaldrand beispielsweise verursachen sinkende Grundwasserstände bei Trockenheit zum Teil Umkehrungen der Fließrichtungen. Die Oberflächengewässer verlieren dadurch Wasser in den Aquifer und können komplett austrocknen (Herzog et al., 2022).

Ein starker Zusammenhang lässt sich zwischen der Reduktion des NQ und der Grundwasser-Modellstruktur erkennen (Abbildung 5e). Modellstrukturen, die ein langsames Auslaufen bei Trockenheit über einen Speicherteil mit kleinem Auslaufkoeffizienten ermöglichen (LAY und PA2), zeigen eine deutlich geringere NQ-Reduktion als die anderen Modellstrukturen.

Bei der Bestimmung der maximal möglichen weiteren Reduktion des NQ durch die Stresstests zeigt sich, dass für die meisten der EZG eine sehr starke weitere Reduktion des NQ möglich ist (Abbildung 6). Es muss in diesen Gebieten davon ausgegangen werden, dass sich verschärfte Vorbedingungen in hohem Maße auf den NQ auswirken können und somit durch veränderte Klimabedingungen deutlich stärkere Niedrigwasserextreme möglich sind.

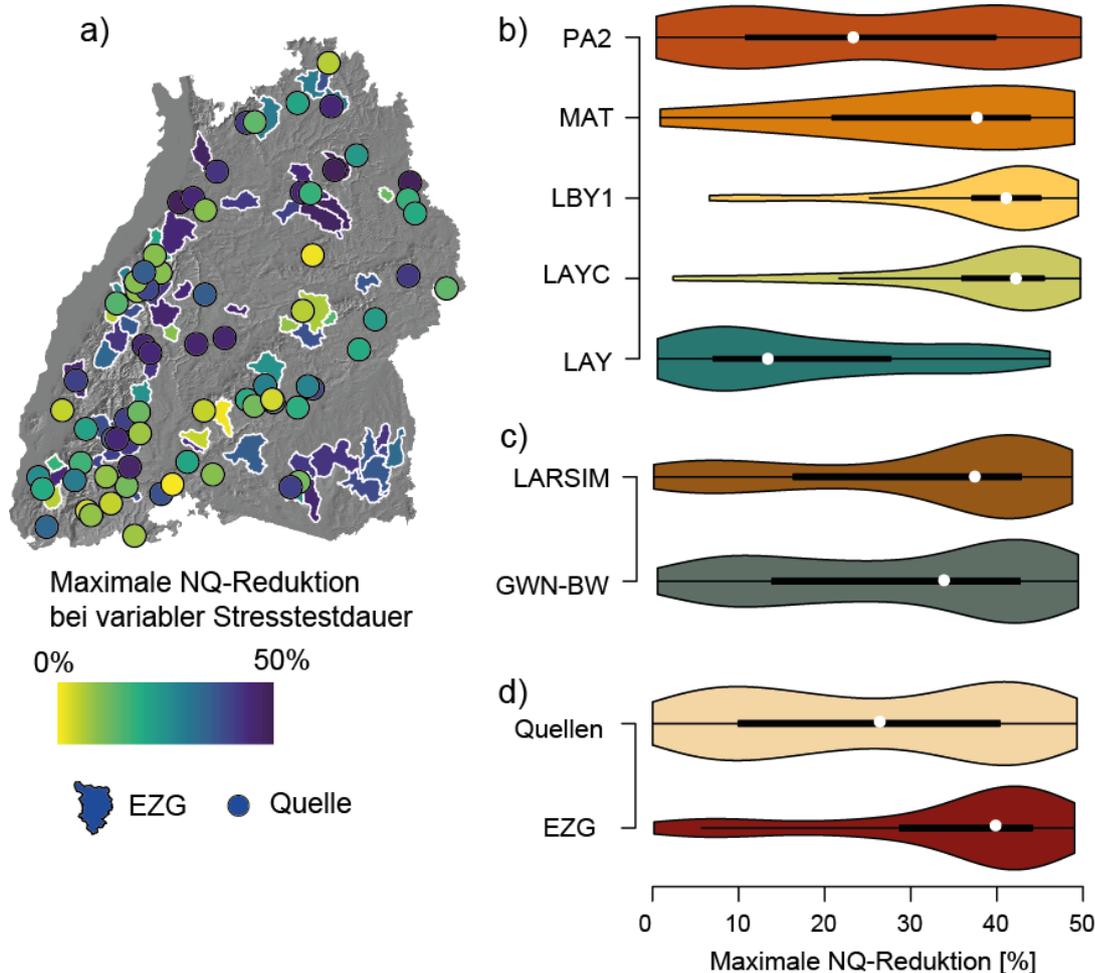


Abb. 6: Maximale Reduktion des NQ infolge von Stresstests über einen variablen Zeitraum mit Reduktion der GWN in Höhe von 50%. a) Räumliche Darstellungen mit dem Modellinput aus GWN-BW. Violinplots zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung der maximalen NQ-Reduktion für unterschiedliche Kategorien, unterschieden nach b) Grundwasser-Modellstruktur, c) Modellinput und d) Art des Untersuchungsgebiets.

Im Gegensatz hierzu stehen die Ergebnisse für die Quellen, bei denen sich zwei Gruppen unterscheiden lassen (Abbildung 6d): Während ein Teil der Quellen ähnlich sensitiv für veränderte Vorbedingungen ist wie die EZG, lässt sich für etwa die Hälfte der Quellen eine deutlich geringere Sensitivität beobachten. Hier ist auch unter verschärften Vorbedingungen nicht mit

deutlich geringeren Schüttungen als in der Vergangenheit zu rechnen. Für die beiden Gruppen an Quellen lässt sich kein klares räumliches Muster feststellen.

Für die unterschiedlichen Grundwasserneubildungszeitreihen aus LARSIM und GWN-BW sind die Unterschiede insgesamt klein, die maximal möglichen NQ-Reduktionen sind für LARSIM geringfügig höher (Abbildung 6c). Generell sind die Sensitivitäten gegenüber veränderten Vorbedingungen aber vor allem abhängig von den Eigenschaften des Grundwassersystems, das sich im Modell stark in der Modellstruktur widerspiegelt. Systeme, die am besten durch die Struktur LAY simuliert werden, haben eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber trockeneren Vorbedingungen als beispielsweise LAYC oder LBY1 (Abbildung 6b). Da der Modellinput auch die Auswahl der optimalen Modellstruktur beeinflusst, ergeben sich für die unterschiedlichen Inputs auch verschiedene Sensitivitäten.

Genau wie die maximale NQ-Reduktion variiert auch der relevante Vorbedingungszeitraum T_{\max} stark innerhalb Baden-Württembergs von wenigen Monaten bis zu mehreren Jahren (Abbildung 7). Und auch für T_{\max} ergibt sich kein klares räumliches Muster. Der Mittelwert liegt sowohl für EZG, als auch für Quellen im Bereich von einem halben bis einem Jahr.

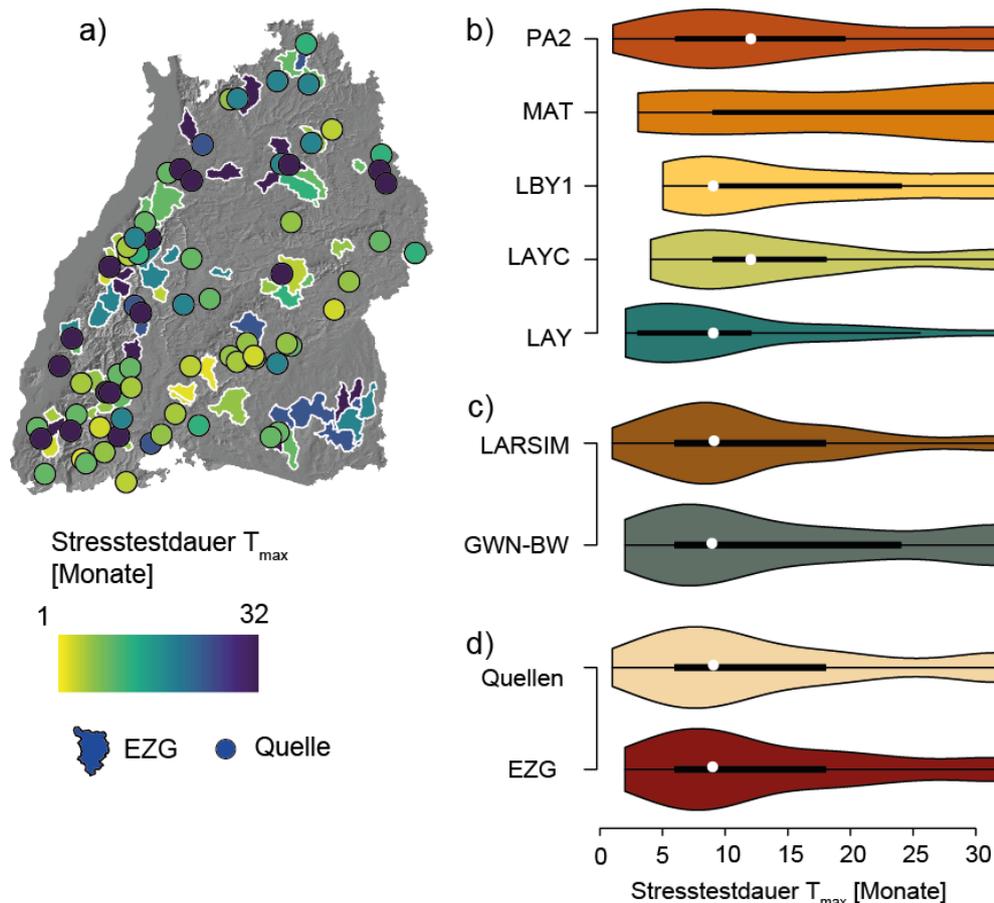


Abb. 7: Stresstestdauer T_{\max} , für die die maximale Reduktion des NQ eintritt. a) Räumliche Darstellungen mit dem Modellinput aus GWN-BW. Violinplots zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung von T_{\max} für unterschiedliche Kategorien, unterschieden nach b) Grundwasser-Modellstruktur, c) Modellinput und d) Art des Untersuchungsgebiets.

Das bedeutet, dass für die meisten Gebiete eine verstärkte Trockenheit über eine Haupt-Neubildungssaison (d.h. das Winterhalbjahr) den NQ bereits maximal reduziert. In diesen Gebieten ist das „Gedächtnis“ gegenüber länger zurückliegenden Bedingungen und damit deren Einfluss minimal. Auf der anderen Seite sind auch Ereignisse von deutlich kürzerer Dauer als T_{\max} von geringerer Bedeutung, d.h. das Ausbleiben von GWN über 3 Monate führt noch nicht zu extrem geringen Abflüssen und Schüttungen. Gerade das kleinräumige Muster von T_{\max} bietet dabei eine große Chance: Je nachdem auf welcher Zeitskala ein Wasserdefizit auftritt, gibt es immer regional EZG oder Quellen, die hierauf nicht mit extremer Sensitivität reagieren. Für die Wassernutzung ergibt sich aus der regionalen Diversifizierung ihrer Quellen somit eine höhere Toleranz gegenüber Trockenheit.

Um die räumlich diversen Muster von NQ_{\max} und T_{\max} zu erklären, wurden zunächst jeweils für GWN-BW und für LARSIM die Stresstestergebnisse für 4 Jahre (2003, 2011, 2015, 2018) und 4 Reduktionsstufen (25, 50, 75, 100%) gemittelt. Anschließend wurde für die 62 Einzugsgebiete eine ANOVA über ihre Einzugsgebietseigenschaften durchgeführt. Dabei zeigt sich ein Zusammenhang, der die räumlichen Muster teilweise erklären kann. Neben der Grundwassermodellstruktur spielt für die Stresstests mit GWN-BW auch der Aquifertyp und Anteil an Wasserschutzgebieten im EZG (als Maß für die GW-Nutzung) eine signifikante Rolle (Tabelle 1). Für die Stresstests mit LARSIM hängen die räumlichen Muster auch signifikant mit der Einzugsgebietsfläche zusammen. Die EZG-Eigenschaften haben also einen maßgeblichen Einfluss auf die Stresstestergebnisse, der jedoch durch die hohen Unsicherheiten bei Modellinput und Modellstruktur beeinflusst ist.

Tab. 1: Signifikante ($\alpha=0,05$) Prädiktoren in der ANOVA (absteigend geordnet nach ihrer Signifikanz).

Variable	Signifikante Prädiktoren GWN-BW	Signifikante Prädiktoren LARSIM
NQ_{\max}	Aquifertypen im EZG; GW-Modellstruktur; Anteil an Wasserschutzgebieten im EZG	GW-Modellstruktur; Einzugsgebietsfläche; Aquifertypen im EZG
T_{\max}	GW-Modellstruktur; Aquifertypen im EZG; Anteil an Wasserschutzgebieten im EZG; Landnutzung	Mittlere EZG-Höhe; Einzugsgebietsfläche; GW-Modellstruktur; Aquifertypen im EZG; Anteil an Wasserschutzgebieten im EZG

4. Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Stresstest Modellexperimente zeigen, dass bekannte Niedrigwasserereignisse wie im Jahr 2018 in den meisten untersuchten Einzugsgebieten noch stärker ausgefallen wären, wenn die Grundwasserneubildung im Vorfeld noch stärker reduziert gewesen wäre. Die untersuchten Quellschüttungen zeigen sich in diesem Experiment zu einem größeren Anteil resistenter. Solche Experimente wurden für verschiedene systematisch variierte Annahmen in einer großen Zahl von Gebieten durchgeführt. Dabei zeigen sich sowohl für die mögliche Verschärfung des Niedrigwasserabflusses als auch für die Zeit mit der maximal wirksamen Reduktionsdauer jedoch nur wenig räumliche Systematiken, dafür eine starke Abhängigkeit

von der gewählten konzeptionellen Grundwasser-Modellstruktur. Weitere Einflussfaktoren variieren in den bisher durchgeführten Experimenten und sollten noch systematischer untersucht werden. Auf jeden Fall zeigen die Abhängigkeiten, dass zunächst ein Ensemble Ansatz mit verschiedenen Modellkomponenten für solche Experimente wichtig ist, bevor Ergebnisse zu Planungszwecken verwendet werden. Insgesamt legt die angewandte Methodik zum Grundwasser im Stresstest jedoch den Schluss nahe, dass es in Zukunft noch deutlich schlimmere Ereignisse geben könnte, sollten entsprechend verschärfte Bedingungen eintreffen.

Literatur

- Armbruster, V. (2002). Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 17, 158S.
- Bremicker, M. (2000). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 11, 119S.
- Jacob, D., Bülow, K., Kotova, L., Moseley, C., Petersen, J., & Rechid, D. (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. *CSC Report 6*, 51S.
- Hellwig, J., Stoelzle, M., & Stahl, K. (2021). Groundwater and baseflow drought responses to synthetic recharge stress tests. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 1053-1068.
- Herzog, A., Stahl, K., Blauhut, V., & Weiler, M. (2022). Measuring zero water level in stream reaches: A comparison of an image-based versus a conventional method. *Hydrological Processes*, 36(8), e14658.
- Stahl, K., Tallaksen, L. M., Hannaford, J., & Van Lanen, H. A. J. (2012). Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2035-2047.
- Stoelzle, M., Stahl, K., Morhard, A., & Weiler, M. (2014). Streamflow sensitivity to drought scenarios in catchments with different geology. *Geophysical Research Letters*, 41(17), 6174-6183.
- Stoelzle, M., Schuetz, T., Weiler, M., Stahl, K., & Tallaksen, L. M. (2020a). Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), 849-867.
- Stoelzle, M., Staudinger, M., Stahl, K., & Weiler, M. (2020b). Stress testing as complement to climate scenarios: recharge scenarios to quantify streamflow drought sensitivity. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383, 43-50.

Danke

Daten und Projektfinanzierung stammen von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW).

Manuela Nied, Thomas Gudera, Andreas Morhard und Volker Armbruster gaben der Modellierung wesentliche Impulse.

Analyse der flussgebietsübergreifenden extremen Niedrigwasser der Jahre 1921, 1947 und 2018 in Deutschland

Daniel Schwandt, Martin Helms, Gerd Hübner

Zusammenfassung

Ausgehend von wiederholt aufgetretenen längeren niederschlagsarmen Phasen in Mittel- und Westeuropa entwickelten sich in den Jahren 1921, 1947 und 2018 langanhaltende extreme Niedrigwasserzustände in nahezu allen großen Flüssen Deutschlands (im Jahr 1947 mit Ausnahme der Oder). Für die dargestellten Pegel an Rhein und Elbe gehörten die in diesen Jahren erreichten Niedrigwasserkennwerte zu den extremsten Werten des Zeitraums 1901 – 2020. Die fehlende Verdünnung von Abwässereinleitungen führte zu temporär erhöhten Chloridkonzentrationen und höherer Wasserhärte, jeweils in Abhängigkeit vom allgemeinen Belastungsniveau der Einzeljahre.

Die systematische Aufarbeitung und eine breit gefächerte Auswertung der Niedrigwasserereignisse der Jahre 1921 und 1947 verbessern das Verständnis möglicher Niedrigwasserausprägungen und -folgen. Auf dieser Basis können auch Niedrigwasser der jüngeren Vergangenheit, wie 2018, im langfristigen hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Kontext fundiert eingeordnet und bewertet werden.

1. Einleitung

Hydrologische Extremereignisse sind seltene Ereignisse mit ungewöhnlich hoher bzw. niedriger Ausprägung ihrer Prozessvariablen, von denen bisher nur wenige von hochaufgelösten Messsystemen erfasst wurden. Für die raumzeitliche und prozessbezogene Plausibilisierung, Charakterisierung sowie für die (statistische) Einordnung aktueller Ereignisse ist ein Blick in die Vergangenheit notwendig. Extreme flussgebietsübergreifende Niedrigwasserereignisse – wie zuletzt im Jahr 2018 – finden sich im 20. Jahrhundert insbesondere in den Jahren 1921 und 1947. Am Beispiel von Rhein und Elbe wird sowohl eine wassermengenbezogene Einordnung der drei Niedrigwasserereignisse vorgenommen als auch die Wasserbeschaffenheit während dieser Niedrigwasserphasen vergleichend betrachtet. Bereits in Schwandt et al. (2022) publizierte Auswertungen zu den Niedrigwasserjahren 1921 und 2018 werden um Ergebnisse aus dem Jahr 1947 ergänzt. Die Aufbereitung, Nutzung und Interpretation wasserwirtschaftlicher Altdaten erfolgt unter Berücksichtigung der von der Gegenwart abweichenden Randbedingungen (z. B. Ausbau und Betrieb von Talsperren).

2. Hydrometeorologische Situation und Wasserführung

2.1 Großwetterlagen

Mit der atmosphärischen Zirkulation und den daraus abgeleiteten 29 Großwetterlagen Europas (GWL) nach Hess & Brezowsky (Werner & Gerstengarbe, 2010) sind Bewegungen bzw. Blockaden von Luftmassen verbunden. 1921, 1947 und 2018 wurde die Zufuhr feuchter Atlantikluft besonders häufig durch eine Hochdruckbrücke (BM) oder ein Hoch (HM) über Mitteleuropa blockiert. In Tabelle 1 ist für diese Jahre die Dauer niederschlagsarmer GWL dargestellt, die nach Werner & Gerstengarbe (2010) an Messstationen in Deutschland unterhalb von 1.000 m ü. NN mittlere Tagessummen des Niederschlags von ca. 1 mm oder weniger aufweisen. Die Gesamtzahl der Tage mit diesen niederschlagsarmen GWL war 1921 mit 216 Tagen höher als 1947 (193 Tage) und weit höher als 2018 (130 Tage). In den Jahren 1921 und 1947 gab es längere zusammenhängende Zeiträume niederschlagsarmer GWL als 2018 (Abbildung 1).

Tab. 1: Niederschlagsarme Großwetterlagen: Anzahl der Tage in den Jahren 1921, 1947 und 2018 (GWL-Daten: Werner & Gerstengarbe, 2010; DWD, 2018).

Niederschlagsarme Großwetterlagen	Abk.	1921	1947	2018
Hochdruckbrücke Mitteleuropa	BM	41	30	38
Hoch über Mitteleuropa	HM	58	36	14
Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal	HNa	19	3	3
Hoch Britische Inseln	HB	6	7	0
Hoch Fennoskandien, antizyklonal	HFa	23	26	10
Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal	HNFa	0	11	3
Südwestlage, antizyklonal	SWa	3	14	9
Südostlage, antizyklonal	SEa	15	15	6
Südlage, antizyklonal	Sa	10	0	14
Nordwestlage, antizyklonal	NWa	31	9	15
Nordostlage, antizyklonal	NEa	10	35	11
Nordlage, antizyklonal	Na	0	7	7
Summe [Tage]		216	193	130

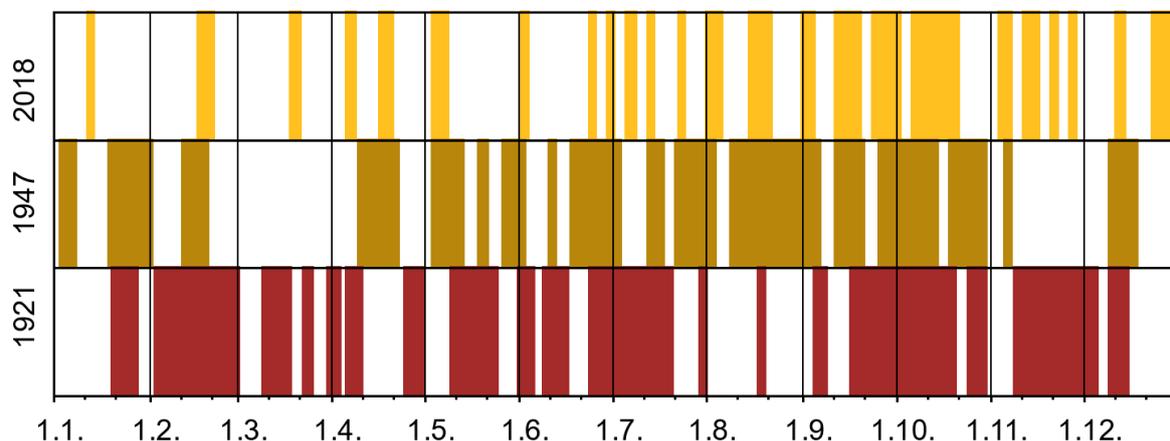


Abb. 1: Niederschlagsarme Großwetterlagen (Tabelle 1) der Jahre 1921, 1947 und 2018.

2.2 Lufttemperatur und Niederschlag

Zur Einordnung der in den Jahren 1921, 1947 und 2018 in Deutschland (heutige Staatsgrenzen) vorherrschenden Witterung erfolgt in Abbildung 2 ein Vergleich der mittleren Niederschlagshöhen und Lufttemperaturen dieser Jahre. Gegenübergestellt ist ferner der vieljährige Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 (DWD-CDC, 2022), die unserer Klimawahrnehmung aus den letzten Jahrzehnten entspricht.

Die Jahressummen der Niederschläge waren in allen drei Jahren im deutschlandweiten Mittel gegenüber der jüngsten Klimareferenzperiode unterdurchschnittlich. Während im Jahr 1947 knapp 90 % dieses vieljährigen Mittels fielen, waren es 1921 und 2018 jeweils nur knapp 75 % bzw. 1921 nur 65 %, wenn der vorangehende Herbst einbezogen wird (Oktober 1920 - Dezember 1921). Die jährlichen Niederschlagssummen haben jedoch nur begrenzte Aussagekraft, da sie die Verteilung im Jahresverlauf nicht wiedergeben. So fiel im Januar 1921, im Januar und Dezember 2018 sowie im November und Dezember 1947 reichlich Niederschlag,

der Defizite anderer Monate auf Jahressicht teilweise ausglich. Dagegen waren die monatlichen Niederschlagsmengen der Jahre 1921 und 2018 jeweils von Februar bis November (10 Monate) stets unterdurchschnittlich und erreichten insgesamt nur ca. 60 % des vieljährigen Mittels (1991-2020). Im Jahr 1947 war die durchgehend trockene Periode kürzer (Mai bis Oktober, 6 Monate) und folgte auf die relativ niederschlagsreichen Monate März und April, in denen nach sehr kaltem Winter zudem eine Schneeschmelze und vielerorts Hochwasser auftrat. Andererseits waren 1947 die Monate August bis Oktober mit deutschlandweit nur 37 % des vieljährigen Mittels extrem trocken.

Die Niederschlagsarmut wurde in allen drei Jahren durch relativ hohe Lufttemperaturen begleitet (Abbildung 2). Dabei entsprachen die deutschlandweit gemittelten Monatstemperaturen im Sommer und Herbst 1921 etwa den gemittelten Werten der jüngsten Klimareferenzperiode, wurden im damals kühleren Klima jedoch als sehr warm empfunden (z. B. Strub, 1923). Nach strengem Winter war der Sommer 1947 wärmer als 1921: die mittleren Temperaturen der Monate Mai bis September lagen durchgehend und im Schnitt 1,5 K über dem vieljährigen Mittel (1991-2020). Während der anhaltend warmen bis heißen Witterung im Jahr 2018 (April bis Oktober) übertrafen die mittleren Monatstemperaturen stets die Monatsmittelwerte der jüngsten Klimareferenzperiode, im Schnitt um ca. 2 K.

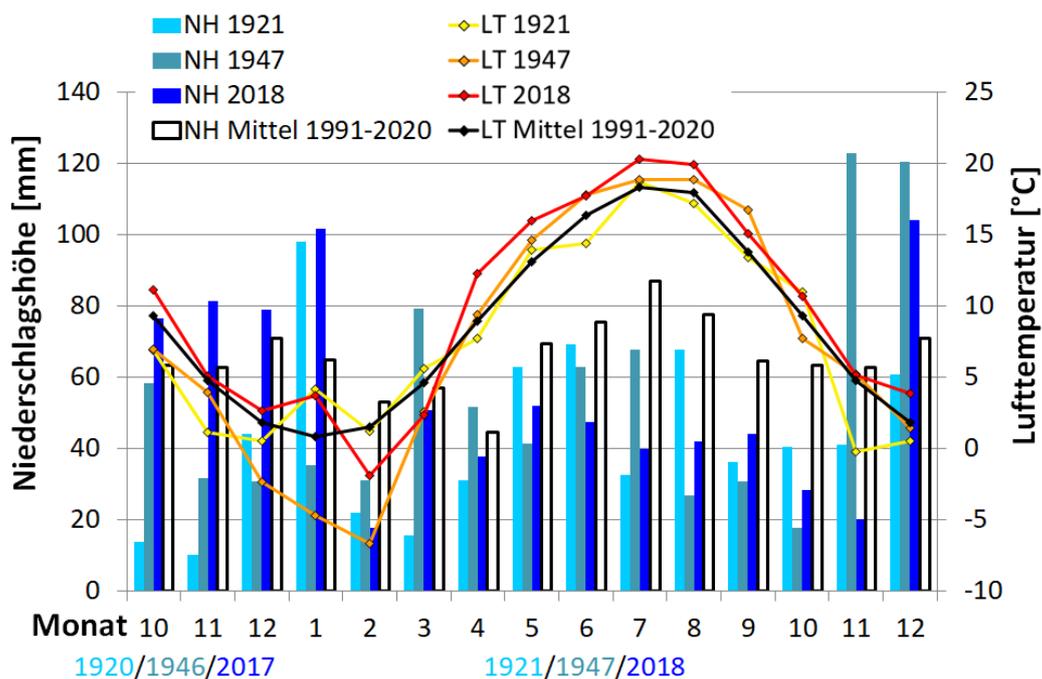


Abb. 2: Deutschlandweit und monatlich gemittelte Lufttemperaturen (LT) und Niederschlagshöhen (NH) der Jahre 1921, 1947 und 2018 (mit jeweils drei Monaten Vorlauf) sowie Monatsmittelwerte der Klimareferenzperiode 1991-2020.

2.3 Wasserführung und hydrologische Einordnung

Zur Analyse der Wasserführung der mitteleuropäischen Flüsse in den Jahren 1921, 1947 und 2018 wurden exemplarisch die Reihen täglicher Durchflüsse von je zwei Pegeln des Rheins (Basel, Köln) und der Elbe (Dresden, Wittenberge) ab dem Jahr 1901 untersucht (Daten: WSV, 2021). Abbildung 3 zeigt Ganglinien der drei Jahre von diesen Pegeln sowie tägliche Niederschlagshöhen geeigneter Wetterstationen (DWD-CDC, 2022). Zur Einordnung der Durchflussdynamik an den Pegeln dienen mittlere jährliche Niedrigwasserdurchflüsse (MNQ) und mittlere jährliche Durchflüsse (MQ) im Zeitraum 1961–2020 sowie Serien folgender Niedrigwasserkenngrößen für die Kalenderjahre 1901–2020:

- NM7Q [m^3/s]: niedrigster siebentägig gemittelter Durchfluss pro Jahr (Unabhängigkeit bei jahresübergreifenden Niedrigwasserphasen, wenn durch Scheitel $>$ MQ getrennt);
- sumD [Tage]: Summe der Unterschreitungsdauern des Schwellenwerts MNQ pro Jahr.

Ferner wurden Streudiagramme der Serien „NM7Q vs. sumD“ (Abbildung 4) für den Zeitraum 1901–2020 erstellt, in denen die Jahre 1921, 1947 und 2018 sowie weitere Jahre mit stark ausgeprägtem Niedrigwasser bezeichnet sind. Extreme Werte, die vermutlich durch eisbedingten Rückstau im Gewässernetz beeinflusst sind, und Perioden unterschiedlicher Einflüsse von Talsperren im Elbegebiet (1901–1964, 1965–2020) sind gekennzeichnet.

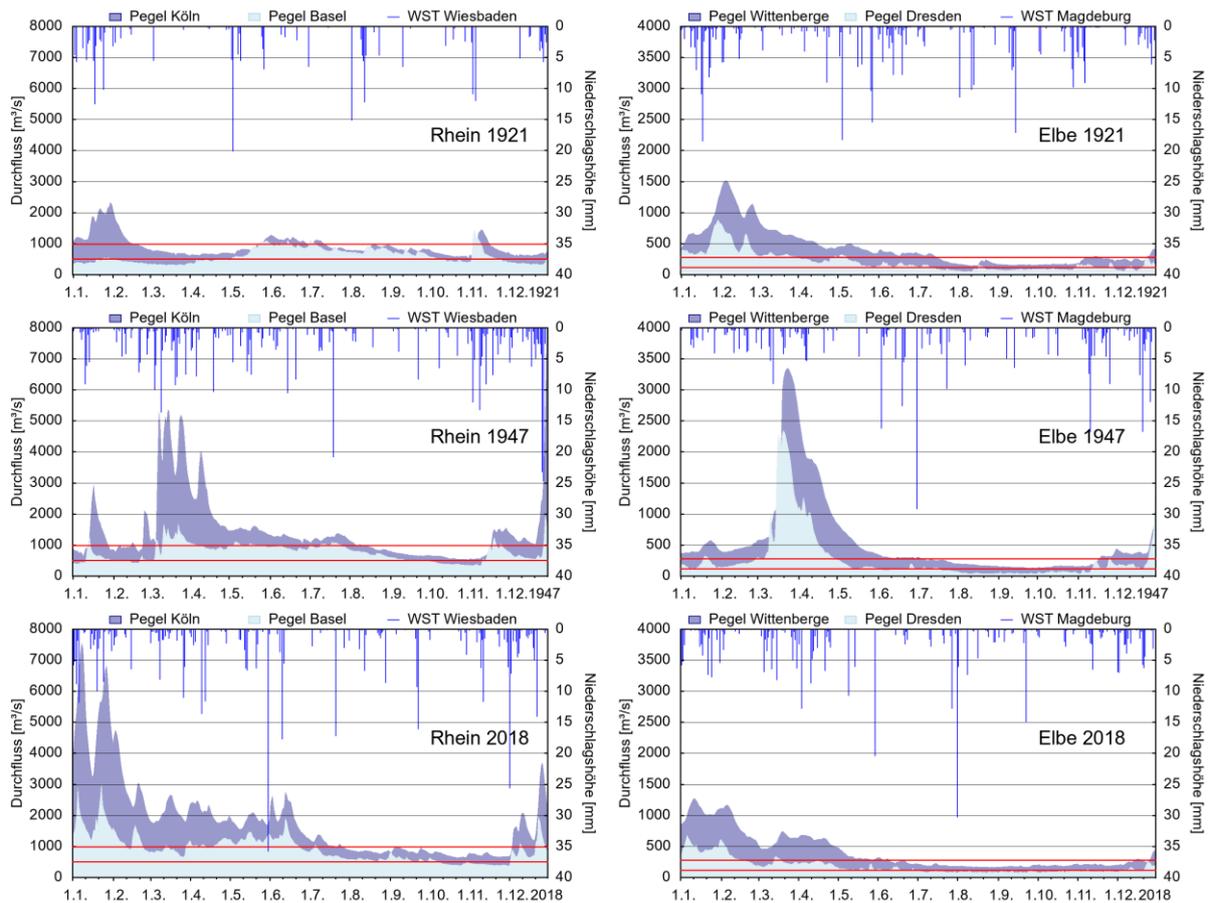


Abb. 3: Tägliche Durchflussganglinien der Jahre 1921, 1947 und 2018 an je zwei Pegeln des Rheins und der Elbe mit den jeweiligen MNQ (rote Linien) und Niederschlagshöhen ausgewählter Wetterstationen (WST).

In den drei betrachteten Jahren prägten sich sowohl an der Elbe als auch am Rhein extreme Niedrigwasser aus, deren raumzeitliche Entwicklung sich jedoch unterschied.

Das Jahr 2018 begann feucht. An beiden Flüssen wurde der MQ deutlich und bis weit in den Februar überschritten, am Rhein mit Hochwasser (Abbildung 3). Nachfolgende Durchflussrückgänge im Frühjahr wurden wiederholt unterbrochen, so dass die Durchflüsse bis in die zweite Aprilhälfte im Bereich des MQ blieben. Im Rhein (Pegel Basel) kam es zudem regimebedingt mit der alpinen Schneeschmelze bis in die zweite Junihälfte zu einem leichten Anstieg bzw. zur Stützung des Durchflusses im MQ-Bereich. Danach (am Rhein später als an der Elbe) bewirkte die anhaltend trockene sommerliche Witterung an beiden Flüssen mehrmonatige Durchflussrückgänge bis zu extremem Niedrigwasser, wobei Minima an der Elbe Ende August oder im September und am Rhein Ende Oktober erreicht wurden, um danach jeweils im Extrembereich zu verharren. Ab Anfang Dezember beendeten deutliche Durchflussanstiege das Niedrigwasser gebietsübergreifend. Insgesamt hatte das Niedrigwasser 2018 im Langfristvergleich (1901–2020) an Elbe und Rhein, wie an allen deutschen Hauptströmen, extreme Ausmaße. Trotz heutigem Talsperreneinfluss gilt dies besonders für die Dauer an der Elbe (Abbildung 4 mit sumD auf Rang 1 bzw. 2), bei Wittenberge auch mit niedrigem NM7Q (Rang 8). Am Rheinpegel Köln gehörten der NM7Q und die Dauer zu den Extremen ab 1901 (Ränge 6 bzw. 4), vor allem auf Grund geringer Zuflüsse im deutschen Teilgebiet (Abbildung 3).

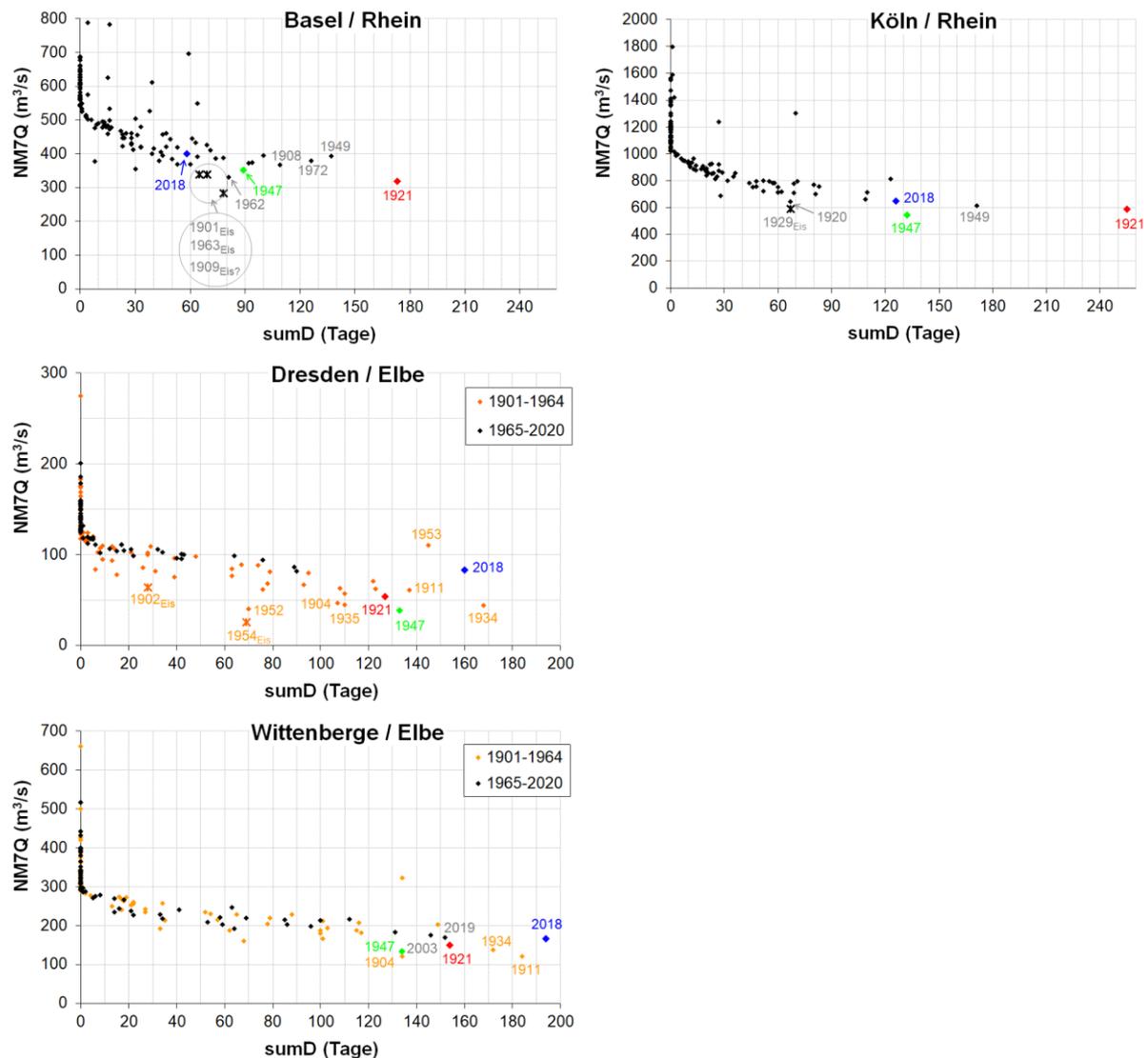


Abb. 4: Kenngrößen NM7Q vs. sumD (s. Text) der Jahre 1901–2020 für Rhein- und Elbepegel. Extreme Ausprägungen sind gekennzeichnet, bei vermutlichem Eiseinfluss durch ein Kreuz.

Das Jahr 1947 begann anders: infolge geringer Niederschläge und anhaltendem Frost wurden am Rhein mehrwöchig die MNQ unterschritten (Abbildung 3). Geringe Durchflüsse (jedoch > MNQ) traten auch an der Elbe auf. Anfang März führte ergiebiger Regen bei milden Temperaturen und Schneeschmelze v.a. an der Elbe zu einem größeren Hochwasser. Am Rhein war das Hochwasser besonders in Alpennähe schwächer, jedoch mehrgipflig (Abbildung 3). Während bei nicht bzw. weniger alpin geprägtem Abflussregime (Elbe bzw. Rheinpegel Köln) nach Abklingen des Hochwassers bereits ab Mitte April ein deutlicher Durchflussrückgang einsetzte, wurde der Durchfluss am stärker alpin beeinflussten Rheinpegel Basel noch bis Ende Juli durch die Schneeschmelze im MQ-Bereich gestützt, ging danach aber auch markant zurück. Bei sehr trockener Witterung verzögerten sich die Rückgänge im Spätsommer/Frühherbst kaum, so dass extremes Niedrigwasser auftrat. Ohne alpin beeinflusstes Abflussregime (Elbe) ergaben sich Minima bis Ende September, im alpin beeinflussten Rhein erst im November.

Mitte November (früher als 2018) beendeten großräumig ergiebige Niederschläge das Niedrigwasser. Dessen Dauer und Intensität hatten im Langfristvergleich ebenfalls gebietsübergreifend (auch an weiteren Hauptströmen außer der Oder) extreme Ausmaße. An der Elbe war die Dauer jedoch kürzer als 2018 (Abbildung 4 mit sumD-Rängen 5 bzw. 9), wobei geringere NM7Q (Ränge 2 bzw. 3) maßgeblich auf noch fehlenden Talsperrenwirkungen in Tschechien beruhten. Am Rhein war gegenüber 2018 auch der Oberlauf stärker betroffen (Pegel Basel in Abbildung 4 mit NM7Q- bzw. sumD-Rängen 6 bzw. 8), woraus auch stromab stärkere Ausmaße resultierten (Ränge 1 bzw. 3 am Pegel Köln).

Bereits kritisch war die Ausgangslage im Jahr 1921. So traten an der Elbe nach trockenem Herbst Ende 1920 Niedrigwasserdurchflüsse um MNQ auf. Im Winter ergab sich eine gewisse Erholung mit mehrwöchigen MQ-Überschreitungen (Abbildung 3). Ab dem Frühjahr kam es bei erneut anhaltender Trockenheit zu Durchflussrückgängen bis zu extremem Niedrigwasser und ab August zur Stagnation in diesem Bereich. Erst gegen Jahresende entspannte sich die Niedrigwasserlage zunächst allmählich, ab Januar 1922 dann deutlich. Im südlichen Rheingebiet war das Niedrigwasser im Herbst 1920 mit Durchflüssen deutlich unter MNQ (in Basel 65 % des MNQ) intensiver als an der Elbe. Die winterliche Erholung war zudem schwach (Abbildung 3), sodass im trockenen Spätwinter erneut Niedrigwasser, mit noch geringerem Durchfluss (62 % des MNQ in Basel), auftrat. Im Frühjahr kam es trotz vorherrschender Trockenheit zu einem allmählichen Anstieg und anschließend bis Anfang Juli zum Verharren des Durchflusses im MQ-Bereich, offenbar maßgeblich durch die alpine Schneeschmelze. Dem folgenden Durchflussrückgang wirkten kleinere Durchflussspitzen (v.a. Anfang November) entgegen, die auf kleinräumige Regenereignisse ohne nachhaltige Wirkung hindeuten. So ergab sich im Herbst 1921 wieder Niedrigwasser (65 % des MNQ in Basel), das erst Ende Dezember endete. Auf der Flussstrecke bis zum Niederrhein, z. B. am Pegel Köln, überlagerten sich die aus den alpinen und nördlicheren Teilgebieten stammenden Zuflüsse (Abbildung 3). Neben den nur wenige Wochen wirksamen Durchflussanstiegen im Januar/Februar und kurz im November bewahrte somit die alpine Schneeschmelze auch den Niederrhein vor einem ganzjährig extremem Niedrigwasser.

Im Langfristvergleich war vor allem das Jahr 1921 gebietsübergreifend extrem. Sowohl die Gesamtdauer (sumD) als auch die NM7Q erreichten jeweils an mindestens einem Pegel der Elbe und des Rheins (sowie der anderen Hauptströme Deutschlands) unter den Jahren 1901–2020 einen der ersten fünf Ränge. An der Elbe waren die NM7Q zwar nicht so gering wie 1947 (Ränge 7 bzw. 5 an den Pegeln der Abbildung 4), die Dauer (Ränge 6 bzw. 4) aber ähnlich oder länger, wenn auch kürzer als im Jahr 2018. Am Rhein (Abbildung 4) war die Gesamtdauer hingegen die weitaus längste im Zeitraum 1901–2020. Auch traten hier – von eisbeeinflussten Ereignissen abgesehen – die (zweit-)geringsten NM7Q auf.

3. Wasserbeschaffenheit

3.1 Wassertemperatur

Niedrigwasser begünstigt die Erwärmung des Wassers, ist jedoch nicht der größte Einflussfaktor (Schwandt et al., 2019). Für die Jahre 1921, 1947 und 2018 wurde die Gleichzeitigkeit von Niedrigwasserverhältnissen und höchsten Wassertemperaturen geprüft. Messdaten für alle drei Jahre lagen nur für die Elbe in Dresden und den Rhein bei Lobith vor. In Dresden

befand sich die Messstelle 1921 am Wasserwerk Saloppe, Elbe-km 51,9 am rechten Ufer (Stadt Dresden, 1922), 1947 und 2018 am Pegel Dresden, Elbe-km 55,6 am linken Ufer (MHD, 1952; WSV, 2021). Am Rhein wurde 1921 und 1947 am Pegel Lobith, Rhein-km 862,2 und 2018 an der Messstelle Lobith Haven, Rhein-km 863,9 gemessen (Rijkswaterstaat, 2020). Für 2018 wurde aus den kontinuierlichen Messungen der Messwert zur korrespondierenden Messzeit 1921 herangezogen. In Lobith war die Messzeit einheitlich 8 Uhr, in Dresden 6 Uhr (1921 und 2018) bzw. 7 Uhr (1947).

Tab. 3: Maximale Wassertemperaturen (Tageswerte zur Messzeit = HT, Monatsmittel aus Tageswerten = MT) in Grad Celsius für die Jahre 1921, 1947 und 2018.

Messstelle		1921	1947	2018
Lobith, Rhein	HT	23,8 (29.7.)	24,5 (4.8.)	26,2 (28.7.)
	MT	21,1 (Juli)	22,2 (August)	23,7 (Juli)
Dresden, Elbe	HT	23,9 (August)	23,8 (30.6.)	26,9 (2.8.)
	MT	19,7 (August)	20,8 (Juli)	23,2 (August)

An den betrachteten Messstellen waren der höchste Tageswert und das größte Monatsmittel der Wassertemperatur im Jahr 2018 höher als 1947 und 1921. Dies wird vor allem den höheren Lufttemperaturen 2018 und am Rhein auch höheren Kühlwassereinleitungen (Zavarsky & Düster, 2020) zugeschrieben.

An der Elbe mit eher pluvialen Abflussregime fallen Niedrigwasser und hohe Wassertemperaturen häufig zusammen. Dort lagen 1921 der Tag mit der höchsten Wassertemperatur, das höchste Monatsmittel der Wassertemperatur und die niedrigste Wasserführung des Jahres im August. 1947 und 2018 wurden die höchsten Wassertemperaturen auch bei niedriger bzw. sehr niedriger Wasserführung registriert, das jeweilige NM7Q jedoch erst im August 1947 bzw. im September 2018. Am Rhein mit nivalen und glazialen sommerlichen Schmelzwasserzuflüssen aus dem Hochgebirge wurden die hohen Wassertemperaturen bei eher niedriger Wasserführung, jedoch nicht in den Phasen extrem niedriger Durchflüsse (Abbildung 3) beobachtet.

3.2 Wasseranalysen und Belastungssituation

Für den direkten Vergleich der Flusswasserbeschaffenheit in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit den Verhältnissen im 21. Jahrhundert kommen nur wenige chemisch-physikalische Kenngrößen in Frage. Zu diesen gehören Chlorid und die Härte des Wassers, die aus der Konzentration der Calcium- und Magnesium-Ionen berechnet wird. Chloridkonzentration und Wasserhärte sind abhängig vom Durchfluss und unterliegen bei Niedrigwasser bei gleichbleibender Abwasserbelastung einer Aufkonzentration. Für die Jahre 1921 und 2018, aus Mangel an Messwerten aber nicht für 1947, können Messwertreihen dieser Kenngrößen an Rhein und Elbe vergleichend dargestellt werden (Abbildung 5).

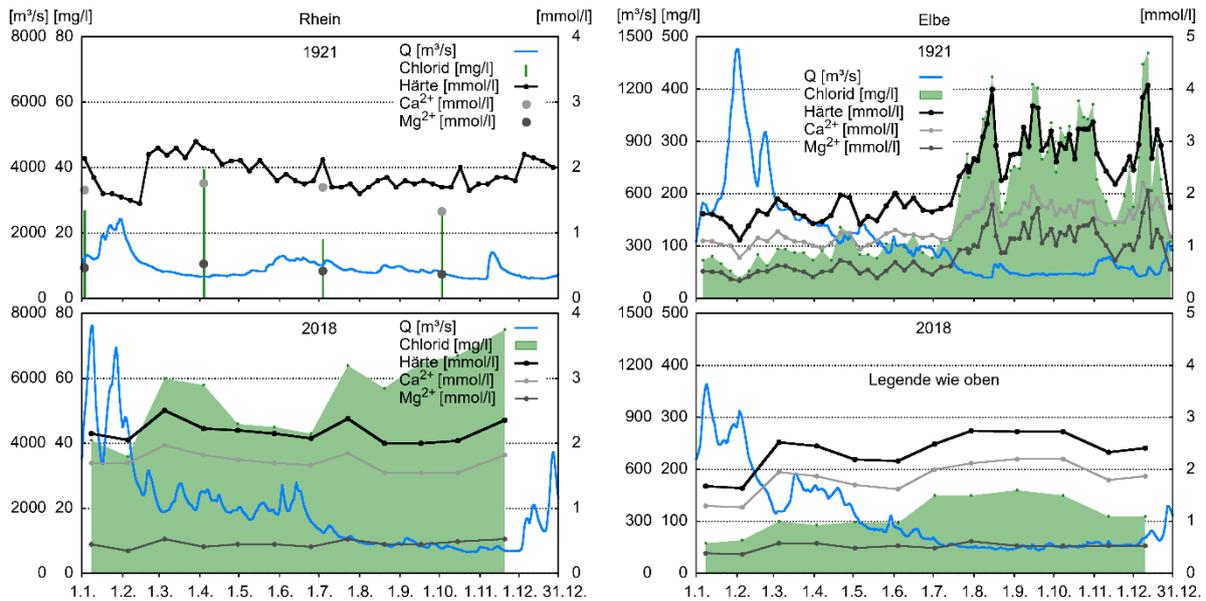


Abb. 5: Chloridkonzentration und Wasserhärte des Rheins in Düsseldorf (links) und der Elbe in Magdeburg (rechts) jeweils am rechten Ufer im Jahr 1921 und 2018 sowie Durchfluss am Pegel Düsseldorf bzw. Magdeburg-Strombrücke (nach STW Düsseldorf, 1921; Land NRW, 2021; Stadt Magdeburg, 1921/1922 und LHW, 2020).

Am Rhein bei Düsseldorf-Flehe (km 732, rechts) wurden 2018 höhere Chloridkonzentrationen ermittelt als 1921, insbesondere während der Niedrigwasserphase im Sommer und Herbst (Abbildung 5). Das Härte-Niveau des Rheins war dagegen in beiden Jahren sehr ähnlich und schwankte nur relativ gering. Am 9.7.1947 wurden im Rhein (km 732, rechts) 77 mg/l Chlorid und eine Härte von 10,4 °dH (1,85 mmol/l) gemessen (Wüstenberg & Sierp, 1947). Da am Messtag bei einem Durchfluss von 1250 m³/s am Pegel Düsseldorf noch kein ausgeprägtes Niedrigwasser vorlag, ist für die extreme Niedrigwasserphase 1947 eine höhere Chloridkonzentration als 2018 anzunehmen. Zur Salzbelastung des Rheins bei Düsseldorf trugen Mitte des 20. Jahrhunderts Abwässer aus Kaligruben der Region Mulhouse (Elsaß) bei, deren Einfluss im Oberrhein besonders deutlich wurde (Töller & Köhle, 1950), vor allem aber auch Abwässer der Sodaindustrie im Raum Nancy, die über die Mosel in den Rhein gelangten (vgl. LEBUA Karlsruhe, 1952).

Das Wasser der Elbe in Magdeburg wurde im Niedrigwasserjahr 1921 intensiv untersucht (ein bis zwei Stichproben pro Woche), da es unmittelbar für die Trinkwasserversorgung der Stadt gebraucht wurde. Entnahme- und Probestelle befanden sich an der rechten Flussseite, die bis heute eine deutlich geringere Salzbelastung aufweist als die von der Saale stark beeinflusste linke Seite. Den Analysen zu Chlorid und Härte im Jahr 1921 werden in Abbildung 5 Untersuchungsergebnisse von monatlichen Stichproben im Jahr 2018 gegenübergestellt. In beiden Jahren zeigte sich während der Niedrigwasserphase im Sommer und Herbst eine Erhöhung der Chloridkonzentration und der Wasserhärte, die 1921 aber erheblich stärker ausfiel als 2018. Ursache waren große Mengen stark salzhaltiger Abwässer aus der Kali- und Steinsalzindustrie im Saalegebiet. Infolge der noch unvollständigen Einmischung des Saalewassers in der Elbe bei Magdeburg ist auch für 1921 an der linken Flussseite von noch deutlich höheren

Konzentrationen des Chlorids und der Härtebildner auszugehen als rechts. Für das Niedrigwasser 2018 sind am linken Ufer der Elbe bis 520 mg/l Chlorid und 6,5 mmol/l Härte belegt (LHW, 2020; Hübner & Schwandt, 2020). Bei einer Elbe-Bereisung während des Niedrigwassers 1947 wurden am 16.8.1947 bei einem Durchfluss von 180 m³/s am Pegel Wittenberge ober- und unterhalb von Schnackenburg 480 mg/l bzw. 520 mg/l Chlorid gemessen (Jaegers, 1947). Am 3.9.2018 erreichte die Chloridkonzentration der Elbe bei Schnackenburg mit 320 mg/l ihren dortigen Höchstwert während des Niedrigwassers, wobei der Durchfluss am Pegel Wittenberg nur 167 m³/s betrug. Dies spricht für eine deutlich höhere Salzbelastung beim Niedrigwasser 1947 gegenüber 2018. Nach Harmsen (1948) stieg die Chloridkonzentration der Elbe beim Hamburger Wasserwerk während des Niedrigwassers 1947 bis auf 480 mg/l und die Härte auf bis zu 19,6 °dH (3,50 mmol/l).

4. Diskussion und Fazit

Das Niedrigwasser 2018 hatte in Mitteleuropa seit Jahrzehnten nicht mehr gesehene flussgebietsübergreifend extreme Ausmaße. Gleichwohl gab es im 20. Jahrhundert vergleichbare Niedrigwasser: 1947 und besonders 1921. Die Untersuchung des Witterungsablaufs und des Abflussgeschehens in den Flussgebieten erfolgte bezogen auf die Wassermenge (Niederschlag und Durchfluss) und die Ereignisdauer. Darauf basierende hydrologische Einordnungen dieser seltenen Niedrigwasserereignisse sowie vergleichende Betrachtungen zur Wasserbeschaffenheit zeigen am Beispiel des Rheins und der Elbe neben vergleichbar extremen Ausprägungen auch individuelle Charakteristika. So unterschieden sich die Extreme hinsichtlich Ausgangssituation, Randbedingungen (u.a. anthropogener Einfluss), zeitlicher Dauer und räumlicher Ausdehnung. Vorliegender Beitrag möchte zur systematischen interdisziplinären Analyse und Auswertung historischer Niedrigwasserereignisse anregen, sowohl zur Einordnung und Bewertung gegenwärtiger Niedrigwasserphänomene, als auch zum erweiterten Verständnis möglicher Ausprägungen und Folgen von extremem Niedrigwasser.

Literatur

- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2018. Monatlicher Klimastatus Deutschland [Januar – Dezember] 2018. <https://www.dwd.de/klimastatus>. Abgerufen am 27.01.2023.
- DWD-CDC (Deutscher Wetterdienst – Climate Data Center), 2022. Regional gemittelte monatliche Niederschlagshöhen und Lufttemperaturen. | Tägliche Stationsmessungen Niederschlagshöhe in mm. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/monthly/ | https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdc_portal/cdc_portal.html. Abgerufen am 11.03.2022.
- Harmsen, H., 1948. Hygienische Probleme der zentralen Hamburger Trinkwasserversorgung. In: Hamburger Wasserwerke (Hrsg.): Festschrift zum 100jährigen Bestehen der Hamburger Wasserwerke, 55-64.
- Hübner, G., Schwandt, D., 2020. Wasserbeschaffenheit beim Elbe-Niedrigwasser 2018 – ein Langzeitvergleich. Ergebnisse der DGL-Jahrestagung 2019 (Münster), 344-350.
- Jaegers, 1947. Untersuchungsergebnisse der Oberelbe zwischen Warwisch und Schnackenburg in der Zeit vom 14.8. bis 16.8.1947. Hygien. Inst. HH., 26.9.1947; BfG-Archiv Nr. 115: 173/1-2, 2 S.+1 Anl. (unveröffentlicht).

- Land NRW (Nordrhein-Westfalen), 2021. Fachinformationssystem ELWAS-WEB, Messstelle 000309, Düsseldorf-Flehe, Rhein, Daten des Jahres 2018. <https://www.elwas-web.nrw.de>. Abgerufen am 27.10.2021.
- LEBUA (Staatliche Lebensmitteluntersuchungsanstalt) Karlsruhe, 1952. Bericht über die Untersuchung des Rheinwassers auf der Strecke von km 362,55 (Maxau) bis km 628 (ob. Linz) vom 7.-10.11.1951. BfG-Archiv Nr. 130: 175/32, 13 S., Anl. (unveröffentlicht).
- LHW (Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt), 2020. Zahlentafeln Fließgewässer 2018. https://lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.0_GLD/Gew_Daten_2018/MEL07_Wasser_EP_2018.pdf. Abgerufen am 27.10.2021.
- MHD (Meteorologischer und Hydrologischer Dienst der DDR) (Hrsg.), 1952. Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch für das Gebiet der DDR – Abflußjahr 1947, Berlin.
- Rijkswaterstaat, 2020. Abfrage Wassertemperatur Lobith. <https://waterinfo.rws.nl>. Abgerufen am 11.12.2020.
- Schwandt, D., Hübner, G., Zavorsky, A., Fricke, K., 2019. Wassertemperatur des Rheins bei Koblenz im Sommer 2018. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 63 (1), 60-63.
- Schwandt, D., Helms, M., Hübner, G., Belz, J. U., Wiechmann, W., 2022. Das extreme Niedrigwasser des Jahres 1921 in den großen Flüssen Deutschlands im Vergleich zum Niedrigwasser 2018. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 66 (5), 225-243. https://doi.org/10.5675/HyWa_2022.5_1.
- Stadt Dresden, 1922. Monatsberichte des Statistischen Amtes der Stadt Dresden. Nr. 1, Januar 1922, 45. Jg., S. 14 (Wasserwerke), Dresden.
- Stadt Magdeburg, 1921/1922. Verwaltungsbericht der städtischen Gas- und Wasserwerke Magdeburg für 1920 bzw. 1921. Stadtbibliothek Magdeburg: Ter P 10.1 Magdeburg.
- Strub, W., 1923. Die Witterung im Jahre 1921. In: Statistisches Amt des Kantons Basel-Stadt (Hrsg.), Statistisches Jahrbuch des Kantons Basel-Stadt 1921, 1. Jg., 298-300, Basel.
- STW (Stadtwerke) Düsseldorf, 1921. Bakteriologische und chemische Untersuchungen für das Jahr 1921. Laborbuch, Archiv Wasserwerk Flehe (unveröffentlicht).
- Töller, W., Köhle, H., 1950. Über den Gehalt an Cl-Ionen im Rheinwasser. Gas- u. Wasserfach 91 (24), 305-306.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., 2010. Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. 7. Auflage. PIK Report 119, Potsdam.
- WSV (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes), 2021. Wassertemperatur / Durchfluss von Pegeln an Bundeswasserstraßen, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Wüstenberg, [J.], Sierp, [F.], 1947. Bericht über die Untersuchung des Rheins auf der Strecke von Remagen bis Emmerich, Stromkilometer 640-852. Hygien. Inst. Ruhrgeb. / Laboratorium Ver. Ruhrverbde. BfG-Archiv Nr. 130: 175/12, 11 S.+15 Anl. (unveröffentlicht).
- Zavorsky, A., Düster, L., 2020. Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures. Hydrology and Earth System Sciences 24, 5027-5041.

Machine-Learning in der Hochwasserprognose – eine Chance zur Integration von gewichteten Ensemble-Ansätzen?

Henning Oppel, Georg Johann, Svenja Fischer, Jenny Kupzig und Benjamin Mewes

Zusammenfassung

Niederschlags-Abfluss-Modelle müssen eine möglichst gute Abbildung der Realität darstellen. Insbesondere Hochwasserereignisse stellen durch die vielseitige Genese eine besondere Herausforderung dar. Häufig werden Parameter Ensemble eingesetzt, um variierende dominierende Prozesse modelltechnisch zu begegnen. Für die Berücksichtigung selten dominierender Prozesse bei der Simulation, ist eine dynamische Gewichtung der Parameter Ensemble zielführend, da bei einer statischen Gewichtung seltene Prozesse i. d. R. nicht berücksichtigt werden. In dieser Studie wird mit einer Machine Learning Komponente eine situative Gewichtung eines Parameter Ensembles entwickelt und anhand einer Fallstudie getestet. Die Ergebnisse zeigen für die Hochwassersimulation eine Verbesserung der Simulationsgüte. Andere Abflussregime werden in der Langzeitsimulation ebenfalls besser abgebildet, was nahelegt, dass mit der situativen Gewichtung sowohl gewöhnliche als auch außergewöhnliche Abflusssituationen adäquat im Modell abgebildet werden.

1. Einleitung

Hydrologische Modelle sind ein zentraler Bestandteil wasserwirtschaftlicher Planungen, weswegen eine möglichst gute Abbildung der Realität durch die Modelle erstrebenswert ist. Hierfür werden hydrologische Modelle auf Grundlage langer Abflusszeitreihen kalibriert. Durch die Kalibrierung mit langjährigen Abflusszeitreihen wird sichergestellt, dass die Modelle ein möglichst breites Spektrum von hydrologischen Situationen abbilden können. Hierdurch wird der Gefahr einer Überanpassung des Modells an einen einzelnen hydrologischen Prozess vorgebeugt. Dennoch kann mit einem so kalibrierten Modell keine vollständige Abbildung der Ganglinie, d. h. der Realität, erreicht werden. Insbesondere Hochwasserereignisse, welche sehr vielseitige Genesen besitzen, stellen eine Herausforderung für kalibrierte Modelle dar. In nahezu allen Modellanwendungen können einzelne Hochwasserereignisse gefunden werden, die nicht in ausreichender Güte abgebildet werden. Diese zeitliche Varianz in der Modellgüte kann mehrere Ursachen haben. Beispielsweise kann sie auf eine außergewöhnliche Niederschlagssituation zurückzuführen sein, bei welcher hydrologische Prozesse dominieren, die lediglich in sehr seltenen Fällen der hauptsächlich auslösende Faktor von Hochwassern sind. Folglich waren solche Situationen in der vorausgegangenen Kalibrierung unterrepräsentiert. Häufig werden Unsicherheiten bei der Simulation durch variierende dominierende Prozesse mit der Verwendung von Parameter Ensembles begegnet (Cloke und Pappenberger 2009). Dabei wird nicht ein einzelner Parametersatz zur Simulation des Abflusses verwendet, sondern eine Vielzahl von Parametersätzen. Durch die Kombination der Simulationsergebnisse aller Parametersätze wird die Unsicherheit der einzelnen Schätzung verringert.

Häufig werden die Simulationsergebnisse des Ensembles gleichgewichtet, oder entsprechend der Modellgüte der Parametersätze gewichtet gemittelt (Beven und Binley, 1992). Diese und vergleichbare Ansätze verwenden statische Gewichte, die nicht entsprechend der aktuellen meteorologischen oder hydrologischen Situation angepasst werden. Für die Berücksichtigung selten aktiver Prozesse bei der Simulation, ist eine dynamische Gewichtung der Parameter

Ensemble zielführend. Hierdurch können sowohl gewöhnliche als auch außergewöhnliche Abflusssituationen abgebildet werden. Besonders für Hochwassersituationen ist eine Ereigniserkennung und situative Gewichtung naheliegend, da sie sich stark in ihrer Genese (z. B. Starkregen vs. Dauerregen) unterscheiden können. Somit sind auch unterschiedliche Parametersätze für unterschiedliche Hochwassersituationen geeignet, welche dementsprechend situativ gewichtet werden sollten, um eine realitätsnahe Abbildung der Hochwassersituation zu erzielen.

In dieser Studie wird das Hochwassermodell NASIM des Oberlaufs der Emscher (siehe Kapitel 3) verwendet, um zu erforschen, ob eine situative Gewichtung die modelltechnische Abbildung von Hochwasserereignissen verbessert. Hierfür werden ML-Algorithmen verwendet, um mittels Niederschlagsprognosen Hochwassersituationen zu erkennen, und eine situative Gewichtung abzuleiten. Speziell wird in dieser Studie der Frage nachgegangen, inwiefern eine situative Gewichtung zu einer Verbesserung in der Hochwasserprognose gegenüber einer einfachen statischen Gewichtung von einem Parameter Ensemble führt.

2. Methodik der situativen Gewichtung

2.1 Ereignisseparation und -klassifikation

Für die situative Gewichtung wurden zunächst Hochwassersituationen basierend auf der Abflusszeitreihe des zu betrachtenden Gebietes definiert. Für die Erkennung und Klassifizierung besonders hoher Hochwasser wurden die höchsten Ereignisse nach der Methodik von Fischer et al. (2021) separiert und nach Fischer et al. (2019) klassifiziert. Die angewendete Klassifikation der Ereignisse beruht dabei auf dem Scheitel-Füllen-Verhältnis der Ereignisse und erlaubt eine Unterteilung der Ereignisse in Hochwasser aus Starkregen (Typ 1), Dauerregen (Typ 2) und Ereignisse aus einer Abfolge von kurzen Niederschlagsereignissen (Typ 3).

Für die Klassifikation kleinerer Hochwasserereignisse wurde eine zusätzliche Separation mit einer *peak-over-threshold* (POT) Methodik durchgeführt. Als Grenzwert (*threshold*) wurde hierbei das 99 %-Quantil der stündlichen Abflusswerte am betrachteten Pegel definiert. Alle neu erkannten Abflusswerte, die diesen Wert überschritten, wurden als kleinere Hochwasser klassifiziert. Für eine vollständige Ereignisseparation wurde um die neu detektierten Hochwasserabflüsse ein Zeitpuffer von zwei Stunden gelegt. Die so erhaltenen Ereignisse wurden dem Datensatz als eigene Kategorie 'unklassifiziert' hinzugefügt. Diese Klasse kann alternativ auch als 'kleine Ereignisse' betrachtet werden. Für diese kleinen Ereignisse wurde keine individuelle Unterscheidung der Genese durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass in diesem Größenbereich keine großen Veränderungen der wirkenden Prozesse auftreten, und dementsprechend ein Parametersatz ausreichend ist, um solche Ereignisse abzubilden.

2.2 Machine Learning Framework

Für die situative Gewichtung wurde ein ML-Framework implementiert, dass zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Simulation eine Wahrscheinlichkeitsprognose der zukünftigen Hochwassersituation produziert. Diese Wahrscheinlichkeitsprognose konnte im Folgenden für die Gewichtung des Parameter-Ensembles verwendet werden. Als Prädiktoren für die zukünftige Hochwassersituation wurden drei Charakteristika des Niederschlags der nächsten 48 Stunden verwendet: die Summe des Niederschlags (ΣN), die maximale Intensität (N_{Max}) und die relative

Anzahl von Stunden innerhalb der nächsten 48 Stunden mit einer Niederschlagsintensität größer null (Λ). Als vierter Prädiktor wurde der Abflusswert zu Beginn des 48-Stunden Zeitfensters (Q_0) verwendet. Diese Prädiktoren enthalten die grundlegenden Informationen, um zwischen kleineren und größeren Niederschlagsereignissen, Dauerregen, Starkregen und Regenabfolge zu unterscheiden.

Die vier Prädiktoren wurden anschließend an ein Ensemble von ML-Algorithmen übergeben. Mit dem Einsatz von einem ML-Ensemble kann ein breiteres Spektrum von Anpassungen abgedeckt werden, wodurch eine bessere Anpassung erzielt wird als mit der Verwendung von einzelnen Schätzern (z.B. Oppel und Schumann 2020, Zounemat-Kermani 2021). Zudem ermöglicht das ML-Ensemble, exklusive Klassifikationsergebnisse von einzelnen ML-Schätzern, in eine Wahrscheinlichkeitsaussage zu überführen. Wenn bspw. von 100 Schätzer 83 prognostizieren, dass ein Hochwasserereignis des Typs Dauerregen ansteht, kann dies in eine Wahrscheinlichkeit von 83 % übersetzt werden. Ein weiterer Vorteil von einem ML-Ensemble, ist, dass zum Training des Ensembles ein sogenanntes Bagging angewendet werden kann, dass einer Überanpassung vorbeugt (Breiman, 2001). Dabei werden die einzelnen Schätzer innerhalb des Ensembles an zufällig ausgewählte Teildatensätze angepasst.

Das vorliegende Klassifikationsproblem ließ sich in zwei Fragestellungen aufteilen: (1) Steht ein Hochwasserereignis bevor? (2) Wenn ein Hochwasserereignis bevorsteht, welcher Hochwassertyp liegt vor? Da es sich um zwei separate Fragestellungen handelt, lag es nahe, zwei separate ML-Ensembles aufzubauen. Beim Training des ersten Ensembles wurden die zuvor beschriebenen Prädiktoren eingesetzt und eine binäre Zeitreihe (Ereignis / kein Ereignis in den nächsten 48 Stunden) als Zielgröße verwendet. Das zweite Ensemble wurde mit einer Teilmenge der zuvor verwendeten Prädiktoren trainiert. Die Daten dieser Teilmenge wurden der Aufgabe des zweiten Ensembles angepasst, die nicht mehr darin bestand zu erkennen, ob ein Ereignis bevorsteht, sondern zu identifizieren, um welchen Hochwassertyp es sich handeln wird. Daher wurden dem zweiten Trainingsdatensatz nur Zeitschritte hinzugefügt, auf die ein Hochwasserereignis in den nächsten 48 Stunden folgte. Der Ergebnisvektor dieser Klassifikation beinhaltet die Klassenlabel der jeweils folgenden Hochwassertypen.

Bei der Anwendung des ML-Frameworks besteht der Rückgabewert des ersten Ensembles aus zwei Wahrscheinlichkeitswerten: Der Wahrscheinlichkeit, dass kein Ereignis auftreten wird $P(Basis)$ und der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis auftreten wird $P(Event)$. Die Summe beider Werte ergibt dabei stets eins. Im nächsten Schritt wird $P(Event)$ mit den Rückgabewerten des zweiten Ensembles multipliziert. Die so entstehenden Werte beschreiben die Wahrscheinlichkeit, ob ein Ereignis auftreten wird und von welchem Typ es sein wird (vgl. Abbildung 1). Diese Wahrscheinlichkeitsaussagen besitzen in Summe den Wert eins und können als Wichtungen für die situative Gewichtung verwendet werden.

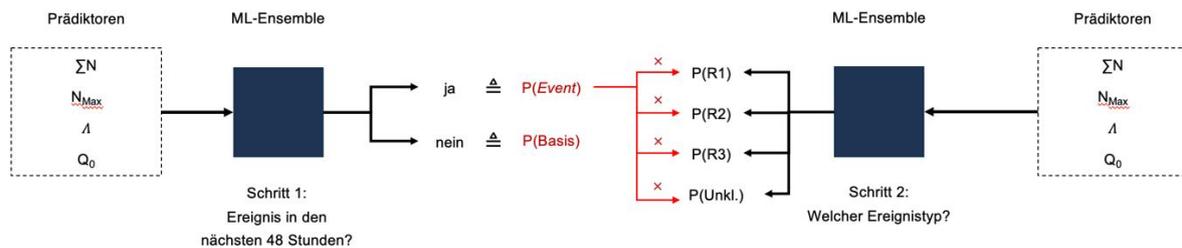


Abb. 1: Prinzipische Skizze der 2-stufigen Machine Learning basierten Prognose, ob ein Hochwasserereignis bevorsteht sowie des zu erwartenden Hochwassertypen. Im dargestellten Fall wird zwischen 4 Typen von Hochwasserereignissen unterschieden.

2.3 Training der ML-Algorithmen

Im ML-Ensemble wurden fünf unterschiedliche Algorithmen verwendet. 20 % der Schätzer wurden vom Typ Classification and Regression Tree (CART) gewählt. Weitere 20 % der Schätzer waren vom Typ Support Vector Machine (SVM), wobei eine Hälfte der SVMs mit einer linearen Basisfunktion und die andere Hälfte mit einer radialen Basisfunktion arbeitet. Diese Funktionen werden von der SVM als Kernel eingesetzt, um die Dimension des Klassifikationsproblems virtuell zu erhöhen. Des Weiteren wurden 2-lagige künstliche neuronale Netze (ANN-2) mit jeweils zehn Neuronen in jeder Schicht, Nächste-Nachbar-Klassifikatoren (KNN) und Gauss-Prozess-Klassifikatoren (GPC) eingesetzt und stellten jeweils weitere 20 % der Schätzer. Alle Algorithmen wurden gemäß der Implementierung von Pedregosa et al. (2011) verwendet.

Zum Training der ML-Algorithmen wurden alle Ereignisse im Zeitraum vom 01.01.2012 bis 01.07.2016 verwendet. Dies entsprach 50 % aller zur Verfügung stehenden Ereignisse. Die verbleibenden 50 % wurden zur Validierung des Konzeptes verwendet. Innerhalb des ML-Ensembles wurden die einzelnen Schätzer mit einem zufällig generierten Teildatensatz der zur Verfügung stehenden Menge von Trainingsdaten trainiert (sog. *Bagging* Verfahren). Die Teildatensätze umfassten jeweils 40 % der zur Verfügung stehenden Daten. Durch die Reduktion der individuellen Trainingsdaten wird einer Überanpassung vorgebeugt, wodurch sich die individuelle Anpassung der ML-Algorithmen leicht verschlechtert.

3. Fallstudie Obere Emscher

Das im Modell NASIM abgebildete Gebiet der oberen Emscher eignete sich besonders gut für die Untersuchung, da es im stark industrialisierten Einzugsgebiet, sehr häufig für wasserwirtschaftliche Fragestellungen herangezogen wird. Das Einzugsgebiet wird über den Pegel Dortmund Dorstfeld definiert, und besitzt eine Einzugsgebietsfläche von 112,2 km². Es lagen Zeitreihen des Niederschlags und weitere Klimadaten sowie die Abflusszeitreihe am Pegel Dortmund Dorstfeld in 15-minütiger Auflösung für den Zeitraum vom 06.12.2012 bis 23.04.2020 vor. Innerhalb dieser Zeitreihen wurden mit Hilfe der Ereignisse-separation (vgl. Kapitel 2.1) insgesamt 91 Ereignisse separiert. Davon wurden 25 als Ereignisse aus Starkregen, 10 aus Dauerregen und 6 als Ereignisse aus einer Regenabfolge klassifiziert, weitere 50 Ereignisse blieben 'unklassifiziert'. Da keine Niederschlagsprognosen für den Zeitraum vorlagen, wurden die

tatsächlich aufgetretenen Niederschläge verwendet, um den jeweils vorausgehenden Zeitraum bzgl. der Niederschläge zu charakterisieren. Für das Einzugsgebiet wurden keine Hochwasser mit einem Einfluss von Schnee(schmelze) identifiziert, sodass dieser Faktor für die Hochwasserprognose nicht berücksichtigt wird.

3.1 Parametersätze

Als sogenannter Basisparametersatz wurde ein Parametersatz definiert, der bei Betrachtung der gesamten Zeitreihe den höchsten Gütewert lieferte. Zur Bewertung der Güte wurde die Nash-Sutcliffe-Effizienz (Nash und Sutcliffe, 1970) verwendet. Neben dem Basisparametersatz wurden vier weitere Parametersätze für den Pegel Dortmund Dorstfeld ermittelt. Jeder der vier zusätzlichen Parametersätze ist speziell für einen Hochwasserereignistyp kalibriert. Diese ereignisspezifische Parameterwahl erleichtert die Zuordnung der Gewichte aus dem ML-Framework. Da die situative Gewichtung im Fokus der Studie stand, wurde mit einer Monte-Carlo-Kalibrierung eine vergleichsweise simple Kalibrierstrategie verwendet. Hierbei wurden 1000 Parametersätze zufällig generiert und mit jedem Parametersatz die gesamte Zeitreihe (2012 - 2020) mit NASIM simuliert. Zur Bewertung der Parametersätze wurde für jeden der vier Hochwassertypen eine zeitliche Maske erstellt. Mithilfe dieser Masken konnten für jede Simulation fünf unterschiedliche NSE-Werte berechnet werden: Ein Wert für den gesamten Zeitraum sowie vier Werte für die vier Hochwassertypen. Für jeden Ereignistyp wurde der jeweils beste Parametersatz als finaler Spezialparametersatz ausgewählt. Die NSE-Werte der ausgewählten Parametersätze sind in Tabelle 1 aufgelistet. Auffällig im Vergleich der Modellgütwerte (Tab. 1) ist, dass alle Parametersätze eine vergleichsweise hohe Güte für unklassifizierte Ereignisse aufweisen. Außerdem erreicht der Parametersatz für unklassifizierte Ereignisse eine besonders hohe Güte für die Ereignisse, die in Folge einer Regenabfolge auftraten, d. h. meist mehrgipflige Abflussereignisse. Dies weist darauf hin, dass ein Großteil der unklassifizierten Ereignisse diesem Typ zugeordnet werden könnte.

Tab. 1: Modellgüte (NSE) der mittels Monte-Carlo-Simulation kalibrierten Parametersätze für alle Ereignistypen; Werte auf der Diagonalen zeigen den NSE-Wert für den Kalibrierzeitraum des jeweiligen Parametersatzes.

Parametersatz	Gesamte Reihe	Starkregen-Ereignisse	Dauerregen-Ereignisse	Regenabfolge	Unklassifiziert
Basis	0,415	0,478	-0,018	0,492	0,478
Starkregen	0,139	0,585	0,252	0,123	0,488
Dauerregen	0,081	0,518	0,624	0,345	0,601
Regenabfolge	-0,081	0,495	0,487	0,679	0,555
Unklassifiziert	-0,043	0,530	0,544	0,678	0,616

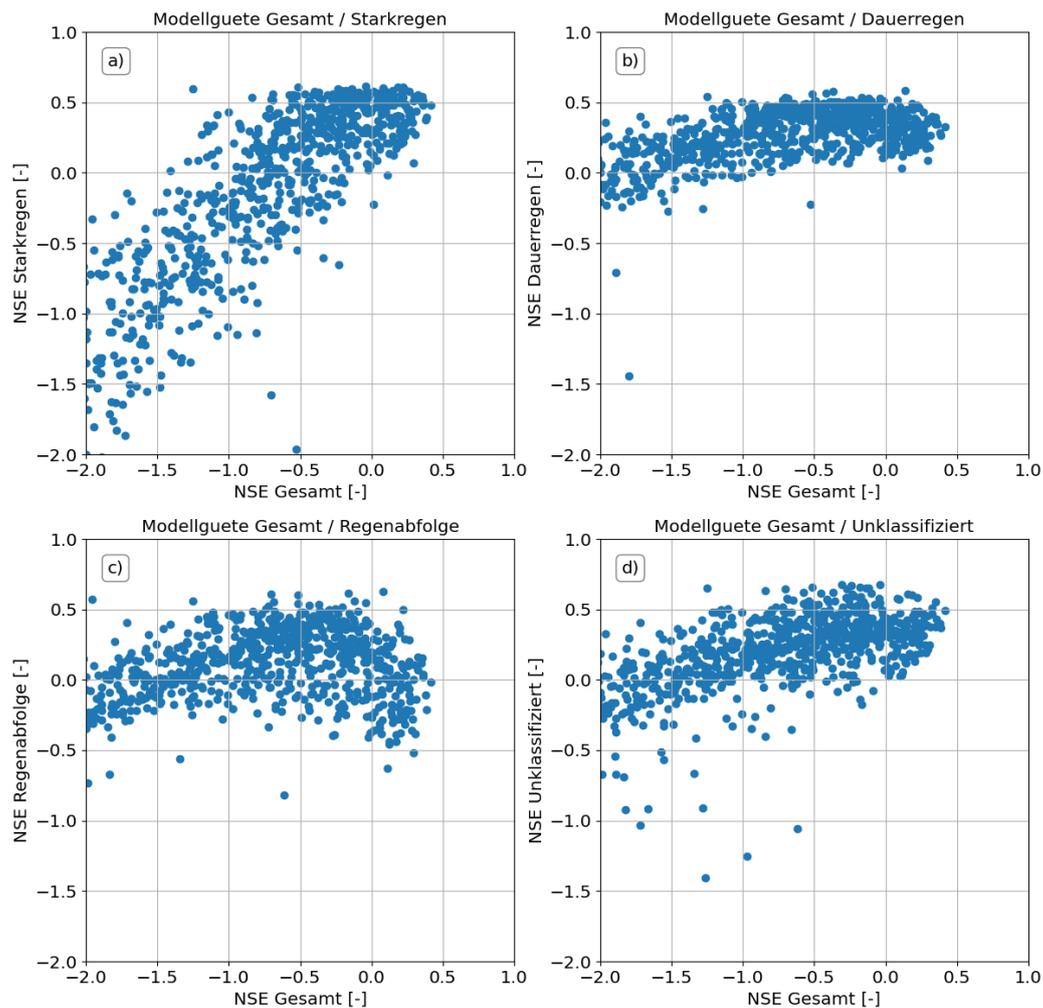


Abb. 3: Gegenüberstellung der berechneten NSE-Werte der mittels Monte-Carlo-Simulation erzeugten Parametersätze.

Für eine Untersuchung, ob die Spezialparametersätze systematische Unterschiede aufweisen, d. h. bestimmte Ereignisse/Prozesse besser abbilden, werden die berechneten NSE-Werte aus der Monte-Carlo-Simulation für die verschiedenen Masken in Abb. 3 gegenübergestellt. In dieser Abbildung sind unterschiedliche Verteilungen der NSE-Beziehungen erkennbar. So bilden die NSE-Wertepaare Gesamtzeitreihe/Starkregenereignisse (Abb. 3a) annähernd eine Gerade. Demzufolge besitzen Parametersätze, welche gute NSE-Werte für die Gesamtzeitreihe besitzen, häufig auch für den Hochwassertyp „Starkregen“ eine hohe Güte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Güte der Gesamtzeitreihe stark durch diesen Ereignistyp bestimmt wird. Im Gegensatz dazu zeichnet die Beziehung der NSE-Wertepaare Gesamtzeitreihe/Regenabfolge (Abb. 3c) eine Pareto-Front. Dies spricht für unterschiedliche systemische Zusammenhänge zwischen den betrachteten Zeiträumen, respektive den Parametersätzen und damit dafür, dass ein einzelner Parametersatz nicht beide Typen gleich gut abbilden kann.

4. Ergebnisse

Die gewichtete Zeitreihe wurde sowohl für den Gesamtzeitraum als auch getrennt nach Trainings- und Validierungsphase ausgewertet. Zwecks Vergleichs wurde eine weitere Ganglinie mit einer statistischen Gleichgewichtung der Simulationsergebnisse erstellt. Neben der Betrachtung im Gesamtzeitraum wurde eine Auswertung ausgewählter Hochwasserereignisse aus der Kalibrierungs- und Validierungsphase durchgeführt. In diesem Beitrag sind exemplarisch drei Ereignisse aus den Jahren 2015 (Kalibrierung), 2016 und 2020 (Validierung) dargestellt. Die ermittelten NSE-Werte für die Zeiträume und die ausgewählten Ereignisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Modellgüte (NSE) verschiedener Ansätze im Gesamt-, Trainings-, Validierungszeitraum sowie für verschiedene Hochwasserereignisse.

	Basis	ML-gewichtet	Gleichgewichtet
Gesamtzeitraum	0,596	0,693	0,674
Training	0,659	0,729	0,689
Validierung	0,523	0,652	0,651
25.06.2016	0,701	0,833	0,800
17.08.2015	0,775	0,855	0,758
23.02.2020	0,555	0,684	0,411

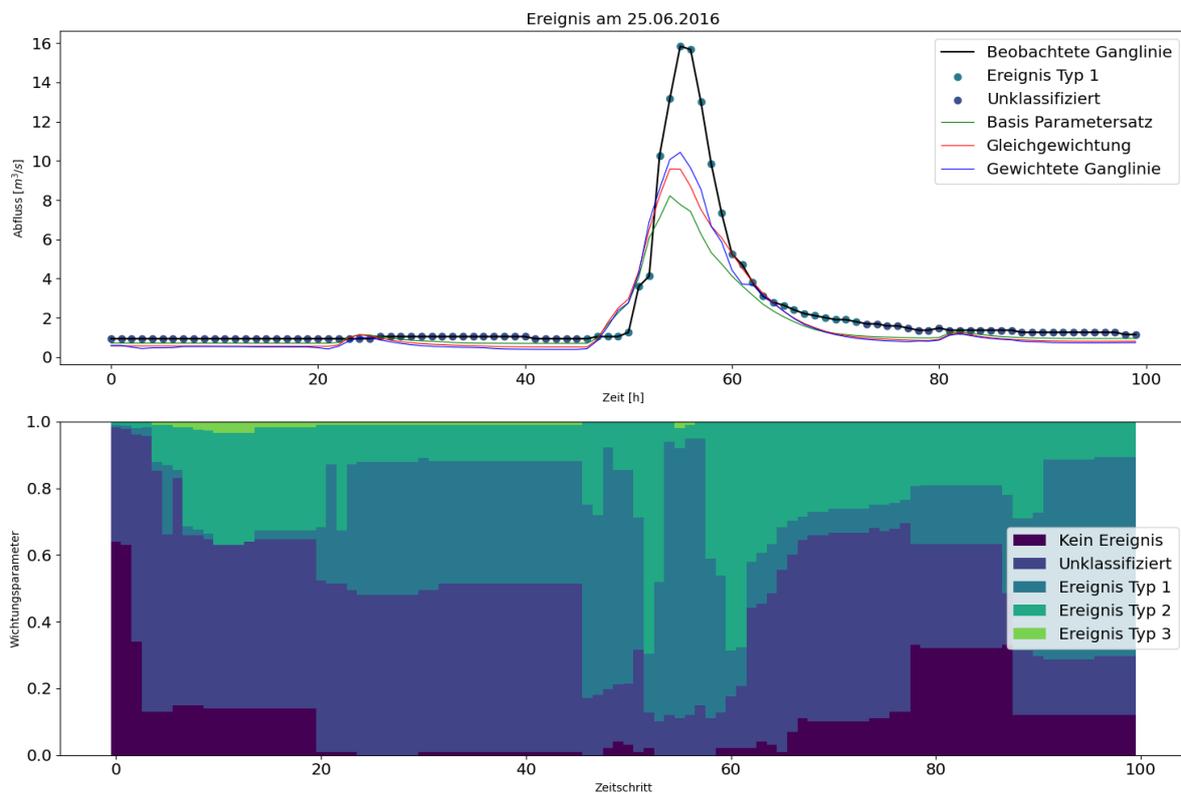


Abb. 4: Ereignis vom 25.06.2016; (oberes Panel) Beobachtete Ganglinie (schwarz) und Simulationen mit dem Basisparametersatz (grün), mit ML-gewichtet (blau) und gleichgewichteter Ganglinie (rot); (unteres Panel) mittels ML erstellte Gewichtung der Ensembles je Zeitschritt.

Die Auswertung der Langzeitsimulationen (Tabelle 2) zeigt, dass die Anwendung der Ensemble-Ansätze einen deutlichen Mehrwert, v.a. im Validierungszeitraum, bringt. Dabei unterscheiden sich die Gleichgewichtung und ML-Gewichtung in der Langzeitsimulation nur geringfügig. Für die Ereignisbasierte Evaluation besitzen die Ensemble-Gewichtungen ebenfalls Vorteile gegenüber dem Basisparametersatz. Besonders bei dem Ereignis aus dem Jahr 2020 besitzt die ML-Gewichtung einen höheren NSE-Wert als die Gleichgewichtung. Für eine genauere Untersuchung der Ereignissimulation sind in den folgenden Abbildungen (Abb. 4-6) die drei Ereignisse dargestellt. Hierfür werden die beobachtete Ganglinie und die drei simulierten Ganglinien (Basis, ML-gewichtet, Gleichgewichtet) gegenübergestellt. Zusätzlich sind in einem weiteren Panel die jeweiligen Gewichte des ML-Frameworks dargestellt. In dieser Darstellung ist die Größe des jeweiligen Gewichts äquivalent zu der farbig dargestellten Fläche.

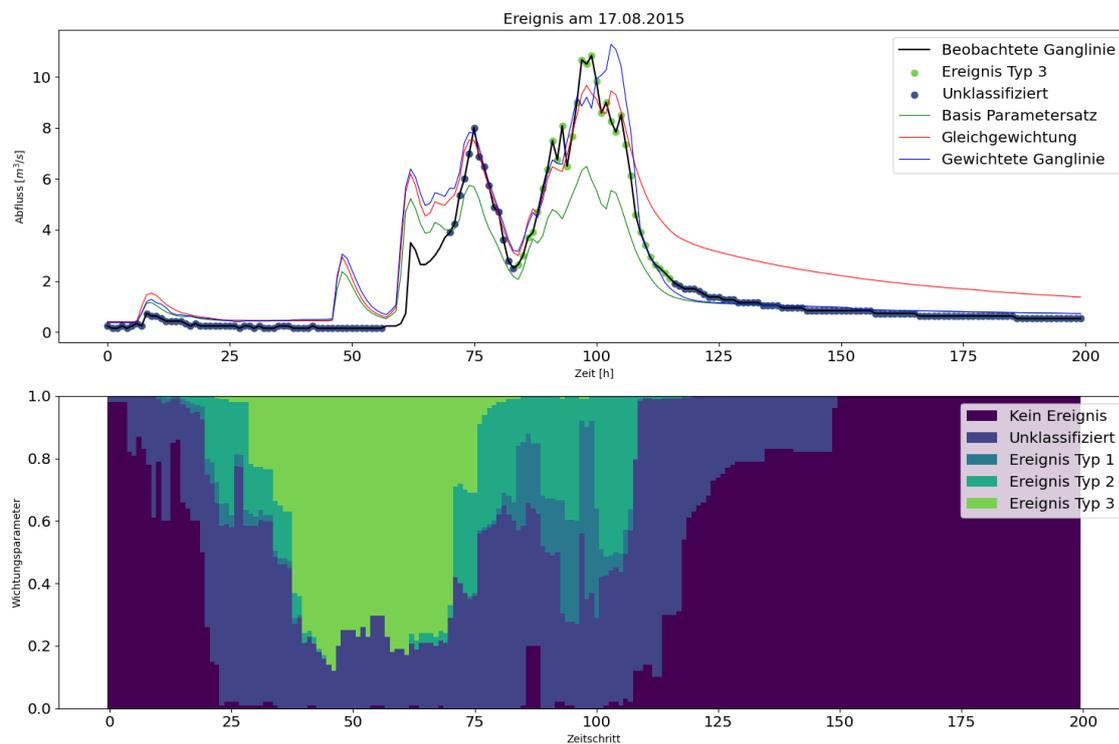


Abb. 5: Ereignis vom 17.08.2015; (oberes Panel) Beobachtete Ganglinie (schwarz) und Simulationen mit dem Basisparametersatz (grün), mit ML-gewichtet (blau) und gleichgewichteter Ganglinie (rot); (unteres Panel) mittels ML erstellte Gewichtung der Ensembles je Zeitschritt.

Abbildung 4 zeigt ein eingipfliges Ereignis vom Typ 1 (Starkregen). Zu erkennen ist, dass sich knapp 48 Stunden im Vorlauf des Ereignisses die Gewichtungen in Richtung Hochwasserereignis verschieben, d.h. der dunkle Bereich bei den Gewichtungen nimmt ab. Diese Verschiebung geht zunächst in Richtung des Typs 'unklassifiziert'. Später, etwas mehr als 24 Stunden vor dem Hochwasserbeginn, verschieben sich die Gewichte in Richtung von Typ 1 (Starkregen) und 2 (Dauerregen). Die resultierende Ganglinie der ML-Gewichte (blau) kann den Peak mit dieser Gewichtung zwar nicht komplett nachbilden, ist ihm aber von allen Simulationen am nächsten.

Ein Ereignis des Typs „Regenabfolge“ (Typ 3) ist in Abb. 5 dargestellt. Das Ereignis besitzt einen vorgelagerten kleineren Scheitel, der mittels POT-Methode als 'unklassifiziert' dem Datensatz hinzugefügt wurde. Auch bei diesem Ereignis zeigt sich, dass etwa 48 Stunden vor dem Ereignis eine signifikante Verschiebung der Gewichte stattfindet. So verschieben sich die Gewichte analog zu Abb. 4 zunächst in Richtung 'unklassifiziert' und etwa 12 Stunden später stark in Richtung von Typ 3 (Regenabfolge). Bei diesem Ereignis trifft die Ganglinie der ML-Gewichtung nicht nur den Peak besser als die anderen beiden Ganglinien (Basis-Parametersatz, Gleichgewichtung), sondern sie bildet auch sehr gut den Rückgang der Welle nach. Insbesondere im Vergleich zum Basis-Parametersatz zeigt sich bei diesem Ereignis eine deutliche Verbesserung.

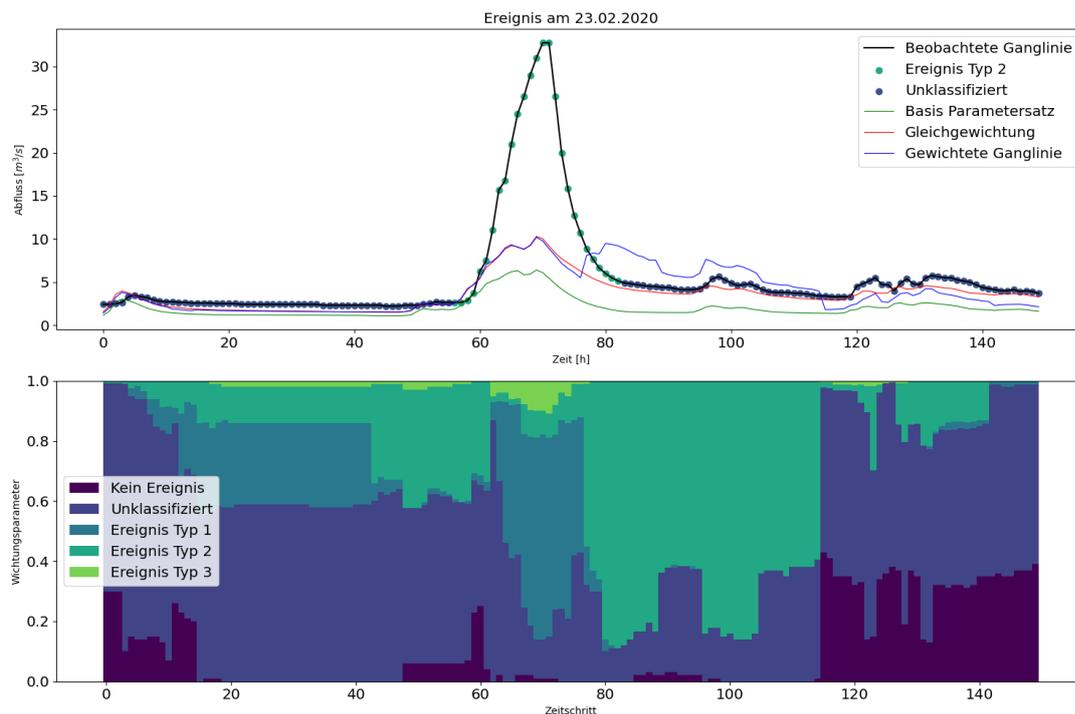


Abb. 5: Ereignis vom 23.02.2020; (oberes Panel) Beobachtete Ganglinie (schwarz) und Simulationen mit dem Basisparametersatz (grün), mit ML-gewichtet (blau) und gleichgewichteter Ganglinie (rot); (unteres Panel) mittels ML erstellte Gewichtung der Ensembles je Zeitschritt.

Ergänzend zu den beiden Ereignissen wurde das Ereignis vom 23.02.2020 (Abb. 6) dargestellt. Das Ereignis ist vom Typ 2 (Dauerregen) und konnte in nicht ausreichender Güte simuliert werden. Alle Parametersätze verfehlen hier den Peak der beobachteten Ganglinie deutlich. Allerdings ist in diesem Beispiel keine der gewählten Strategien in der Lage, das Ereignis besser zu simulieren als die Methode der situativen ML-Gewichtung.

Für alle durchgeführten Ereignisauswertungen konnte gezeigt werden, dass mit der situativen Ensemble-Wichtung durchweg die besten Ergebnisse erzielt werden (vgl. Tabelle 2). Die jeweils im dargestellten Zeitraum durchgeführten Bewertungen der Simulationen spiegeln den visuellen Eindruck wider, dass die situative ML-Gewichtung die Modellgüte deutlich erhöhen kann.

5. Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem entwickelten ML-Frameworks situative Wichtungen für ein Parameter Ensemble ermittelt werden können, welche die Modellsimulation verbessern. In dieser Studie wurde ein besonderer Fokus auf den Hochwasserbereich gelegt, daher wurden auch in diesem Abflussregime die höchsten Verbesserungen der Simulationsgüte erreicht. Anderen Abflussregime werden in der Langzeitsimulation ebenfalls besser abgebildet, was nahelegt, dass mit der situativen Gewichtung sowohl gewöhnliche als auch außergewöhnliche Abflusssituationen adäquat im Modell abgebildet werden. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die entwickelte Methodik Defizite eines allgemeinen Kalibrieransatzes ausgleicht, ohne dafür nachteilige Effekte in Kauf nehmen zu müssen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss beachtet werden, dass im Rahmen der Kalibrierung auf eine aufwendige Bestimmung der Parametersätze verzichtet wurde. Folglich wurde das Potenzial der verwendeten Parametersätze nicht umfänglich ausgeschöpft. Dementsprechend ist zu erwarten, dass mit einer verbesserten Kalibrierroutine und folglich besser kalibrierten Parametersätzen auch eine größere Verbesserung der Güte mit dem ML-Framework erreicht werden kann. Als Einschränkung der Ergebnisse muss angemerkt werden, dass die Anwendung bislang nur mit beobachteten historischen Daten getestet wurde, und Einflüsse von Schnee nicht untersucht wurden. Die Verwendung von tatsächlichen Niederschlagsprognosen zur Prognose von Hochwassertypen wurde bislang nicht betrachtet und sollte in folgenden Studien analysiert werden. Insgesamt hat sich die Methode in der durchgeführten Studie als stabil erwiesen und zeigt klar auf, wie die Gewichtung von Parameter Ensemble, bzw. perspektivisch auch die Kombination verschiedener Modellstrukturen, dynamisiert und auch in der operativen Prognose eingesetzt werden kann.

Literatur

- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32
- Beven, K. & Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298
- Cloke, H., Pappenberger, F., 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, 375, 3-4, 613-626
- Fischer S., Schumann A. und Bühler P., 2019. Timescale-based flood typing to estimate temporal changes in flood frequencies. *Hydrological Sciences Journal* 64 (15), 1867-1892.
- Fischer S., Schumann A. und Bühler P., 2021. Statistics-based automated flood event separation. *Journal of Hydrology X*, 10, 70-100
- Nash, J., Sutcliffe, J., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I --- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290
- Oppel, H, Schumann, A, 2020. Machine learning based identification of dominant controls on runoff dynamics. *Hydrological Processes*, 34 (11), 2450-2465
- Oppel, H., Mewes, B., Hartung, A., 2021. Kontinuierliche Anpassung von Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen. *Wasserwirtschaft*, 111 (7-8), 38-41
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., u. a, 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830

Zounemat-Kermani, M., Batelaan, O., Fadaee, M., Hinkelmann, R., 2021: Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 598

Verbessertes eventbasiertes Hochwasserwarnsystem für kleine Einzugsgebiete mit Hilfe künstlicher Intelligenz und dem CatRaRE-Katalog

Anika Hotzel, Christoph Mudersbach

Zusammenfassung

Die Vorhersage und Warnung von Starkregenereignissen in kleinen Einzugsgebieten ist schwierig aufgrund fehlender Abflussdaten und anderer regionaler Faktoren. Bisherige Vorhersagesysteme stützen sich meist nur auf Niederschlagsvorhersagen und einfache Bodenwasserbilanzierung. Eine verbesserte Vorhersage durch künstliche Intelligenz wird vorgestellt. Die Untersuchungen basieren auf dem CatRaRE-Katalog des Deutschen Wetterdienstes und einem Long Short Term Memory zur Modellierung von Abflussdaten in Gebieten ohne Pegel. Die Eingabegrößen für das LSTM sind der Niederschlag und die Temperatur. Dadurch kann bei einem Niederschlagsereignis berechnet werden, ob in der Vergangenheit kritische Abflusswerte beobachtet wurden. Diese Warnung wird durch weitere Informationen wie die Bodenart, die Größe und Form des Einzugsgebiets sowie dem Vorregenindex und der Stärke der Ereignisse ergänzt und in Form von Hochwasserwarnstufen ausgedrückt.

1. Einführung

Eine effektive Hochwasserwarnung ist von entscheidender Bedeutung, um potenzielle Schäden und Verluste zu minimieren, die durch überflutete Gebiete und Infrastruktur verursacht werden können. In kleinen Einzugsgebieten ist dies besonders wichtig, da hier die Auswirkungen von Hochwasserereignissen oft dramatischer sind und die lokalen Warnsysteme aufgrund ihrer geringeren Größe weniger zuverlässig sind. Zudem gibt es in kleinen Einzugsgebieten häufig keine Abflusspegel, obwohl diese für eine akkurate traditionelle Hochwasserwarnung zwingend notwendig sind. Dies macht die Implementierung von zuverlässigen und effektiven eventbasierten Hochwasserwarnsystemen unerlässlich (Philipp & Kerl, 2017).

Die Verwendung von künstlicher Intelligenz, insbesondere künstlicher neuronaler Netze, hat das Potenzial, die Vorhersagefähigkeit bzw. Warngenauigkeit solcher Systeme erheblich zu verbessern. Mit diesen Netzen können beispielsweise sequenzielle Abflussvorhersagen durchgeführt werden, oder sogar ganze Abflusszeitreihen mit Regionalisierungsansätzen simuliert werden (Arsenault et al., 2023; Kratzert et al., 2019). Ein ausgedehnter Datensatz an hydrometeorologischen Daten und Ereigniskatalogen, wie dem „Catalogue of Radar-based heavy Rainfall Events“ (CatRaRE) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bieten ein großes Forschungspotenzial im Bereich der Hochwasserwarnung (Lengfeld et al., 2022).

2. Daten

Die Datengrundlage bilden Abflussdaten von Fließgewässern in NRW, hydrometeorologische Rasterdaten (HYRAS) für Niederschlag und Temperatur sowie der CatRaRE Katalog des DWD. Des Weiteren wird die Bodenkarte NRW für bodenkundliche Kenngrößen verwendet. Hydrologische und topografische Daten werden der Gewässerstationierungskarte und dem Digitalen Geländemodell (DGM) entnommen. Die Einzugsgebiete werden mit dem DGM ermittelt (< 200 km²). Morphometrische Parameter werden anhand dieser Gebiete und anhand der Gewässerstationierungskarte berechnet. Diese Faktoren werden für das Training des LSTM verwendet, um die Abflussbildung der jeweiligen Einzugsgebiete zu klassifizieren.

2.1 Hydrometeorologie

Als Niederschlags- und Temperaturdaten werden die HYRAS verwendet. Aus diesen Rasterdatensätzen werden an den vorhandene Abflusspegeln Zeitreihen entnommen. Für Einzugsgebiete ohne Pegel, werden fiktive Standorte an den Gebietsauslässen gesetzt, so dass auch für die unbeepegelten Gebiete Zeitreihen erstellt werden können.

Die Abflussdaten werden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW zur Verfügung gestellt.

2.2 Topografie, Morphometrie, Pedologie, Landnutzung

Die Einzugsgebiete werden mit einer Multiple Flow Direction Analyse bestimmt (15-200 km²). Für die Einzugsgebiete werden mit der Gewässerkarte und dem DGM folgende morphometrische Parameter bestimmt, welche für die Simulation der Abflussdaten benötigt werden:

- Fläche
- Umfang
- Länge der Fließgewässer
- Gewässerordnungszahl (Strahler, 1964)
- Anzahl der Fließgewässerabschnitte pro Strahlerzahl (Horton, 1945)
- Verzweigungsverhältnis (Schumm, 1956)
- Dichte des Flusssystem (Horton, 1932)
- Formfaktor (Horton, 1932)
- Streckungsverhältnis (Schumm, 1956)
- Kompaktheitskoeffizient (Strahler, 1952)
- Höhendifferenz (Schumm und Hadley, 1961)
- Reliefverhältnis
- Mittleres Gefälle

Die genannten Parameter sollen dem LSTM dabei helfen, dass Abflussverhalten der Einzugsgebiete zu erkennen und zu bewerten. Die Bodenart und der Durchlässigkeitsbeiwert der EZG wird der Bodenkarte von NRW entnommen (Geologischer Dienst NRW, 2020). Zusätzlich werden die verschiedenen Flächennutzungen aus den CORINE Landcover Daten verwendet (Umweltbundesamt, 2022).

2.3 Ereigniskatalog CatRaRE

CatRaRE ist ein Katalog für Extremniederschlagsereignisse, der auf RADKLIM-Daten des DWD basiert. Dieser umfasst alle Starkregenereignisse seit 2001 in Deutschland. Der Katalog enthält geografische, topografische und demografische Daten der Ereignisorte, sowie Informationen zur Intensität des Niederschlags.

3. Vorgehen

Um die Hochwasserwarnung in kleinen Einzugsgebieten zu verbessern, werden eventbasierte Warnansätze mit Abflusswerten kombiniert. Um das Untersuchungsgebiet zwecks Rechenzeit und Handlichkeit zu begrenzen, wird mittels *k*-Means Algorithmus eine Vorauswahl der Einzugsgebiete getroffen.

Für Einzugsgebiete ohne Abflusspegel werden die Abflusswerte mittels eines LSTM simuliert. Anschließend werden die simulierten und bereits vorhandenen Daten zusammen mit Ereignissen des CatRaRE Katalogs für die Entwicklung einer Hochwasserwarnsystematik genutzt (Abbildung 1).

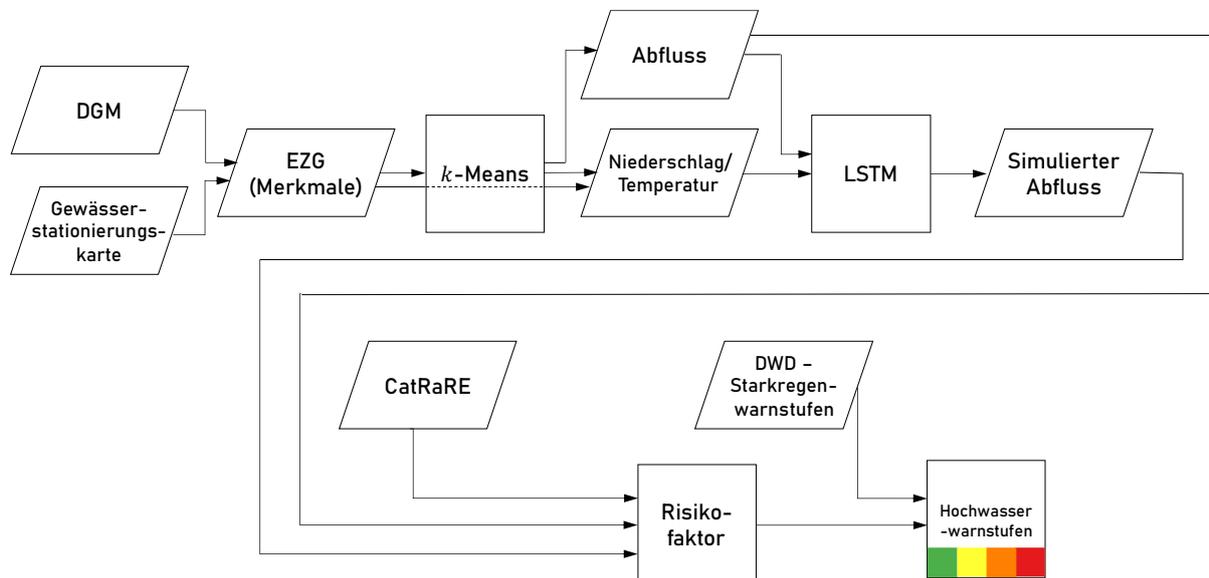


Abb. 1: Vorgehensweise bei der Erstellung von Hochwasserwarnstufen für kleinen Einzugsgebiete mittels LSTM-Methoden

3.1 Long Short Term Memory

Es werden nur die bepegelten Einzugsgebiete für das Training bzw. die Testung verwendet, da der Abfluss der Zielparameter ist, auf den das LSTM hintrainieren soll. Für jedes Einzugsgebiet gibt es einen Datensatz der jeweils den Niederschlag, die Temperatur, den Abfluss und die in Kapitel 2.2 aufgelisteten Faktoren enthält. 77,7 % der Daten gehen in das Training ein und 22,2 % der Daten werden für die Testung des Modells verwendet. Für diese Testung wird angenommen, dass die Testgebiete nichtbepegelt sind, um im Anschluss die Modellgüte bewerten zu können.

Für das Training und die Simulation wird eine LSTM-Architektur gewählt, welche so aufgebaut ist, dass eine Simulation der Abflusswerte der nichtbepegelten Gebiete für den exakt gleichen Zeitraum wie der Trainingsdaten, 37 Jahre (13514 Tage), erfolgen kann. Die für die gegebene Problemstellung am besten geeignete Architektur des LSTM ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 2 dargestellt. Es gibt einen Input Layer mit 100 Neuronen, die anschließend die *Leaky ReLU*-Funktion mit einem α von 0,1 in einem Hidden Layer durchlaufen. Der Output der Aktivierung wird an einen Dropout Layer mit einer Rate von 0,3 weitergeleitet, und der Output Layer hat 13514 Neuronen.

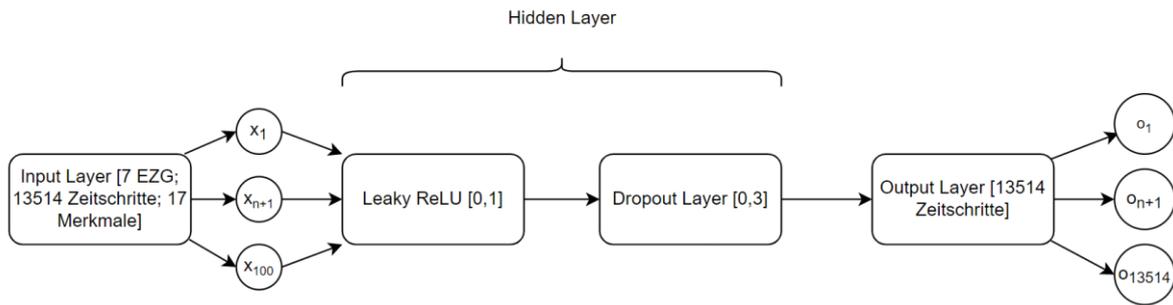


Abb. 2: Architektur des LSTM zur Abflusssimulation unbeepegelter Einzugsgebiete

Das Training wird mit einer Batchsize von 1 durchgeführt. Also wird jedes EZG als ein Ganzes trainiert, um die Reihenfolge des sequenziellen Inputs zu erhalten. Die Eingabeparameter sind die Merkmale des jeweiligen Einzugsgebiets, sowie die Temperatur und der Niederschlag. Der Zielparameter ist der Abfluss. Jeder Batch wird 30-mal durch das LSTM geleitet (30 Epochen). Dabei ist eine gute Entwicklung der mittleren quadratischen Abweichung zu erkennen. Diese fällt jeweils schnell ab und zeigt die Form einer exponentiellen Kurve während des Trainings (Abbildung 3). Die Nash-Sutcliffe-Effizienz zeigt ebenfalls eine zufriedenstellende Entwicklung während des Trainings, der Wert stabilisiert sich bei 0,74 (Abbildung 4). Bei der Testung des LSTM wird eine mittlere quadratische Abweichung von 0,4 und 0,39 erreicht und eine Nash-Sutcliffe-Effizienz von 0,74 und 0,75.

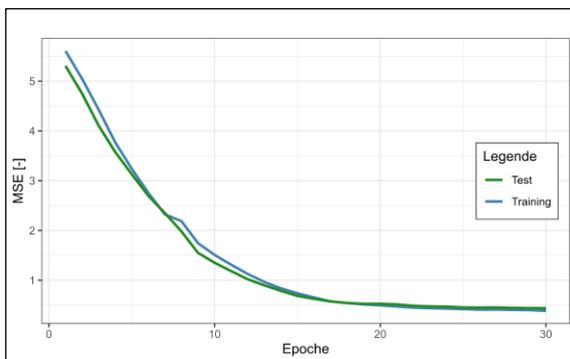


Abb. 3: Entwicklung der mittleren quadratischen Abweichung des LSTM im Training

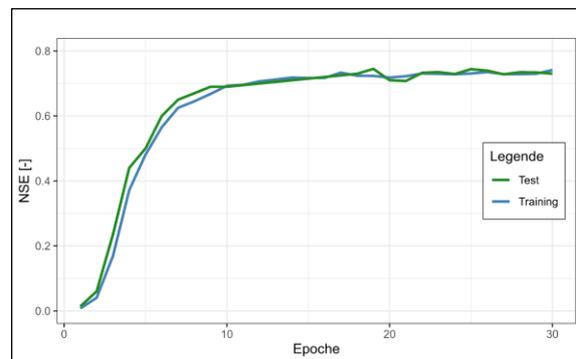


Abb. 4: Entwicklung der Nash-Sutcliffe-Effizienz des LSTM im Training

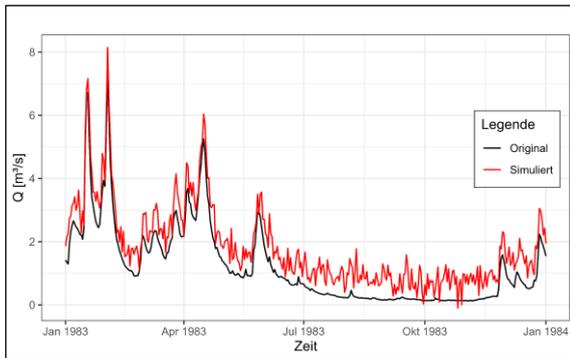


Abb. 5: Vergleich von simulierter und originaler Zeitreihe eines Testgebiets (1) in einem zufällig ausgewählten Jahr

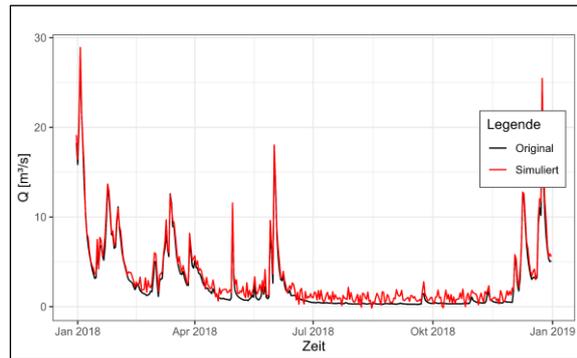


Abb. 6: Vergleich von simulierter und originaler Zeitreihe eines Testgebiets (2) in einem zufällig ausgewählten Jahr

Mit dem LSTM werden dann Abflusszeitreihen für die unbepegelten Einzugsgebiete simuliert. In Abbildung 7 ist beispielhaft für zwei benachbarte Gebiet (je ein bepegeltes und unbepegeltes Gebiet) der Hochwasserscheitel bei gleichem Ereignis dargestellt.

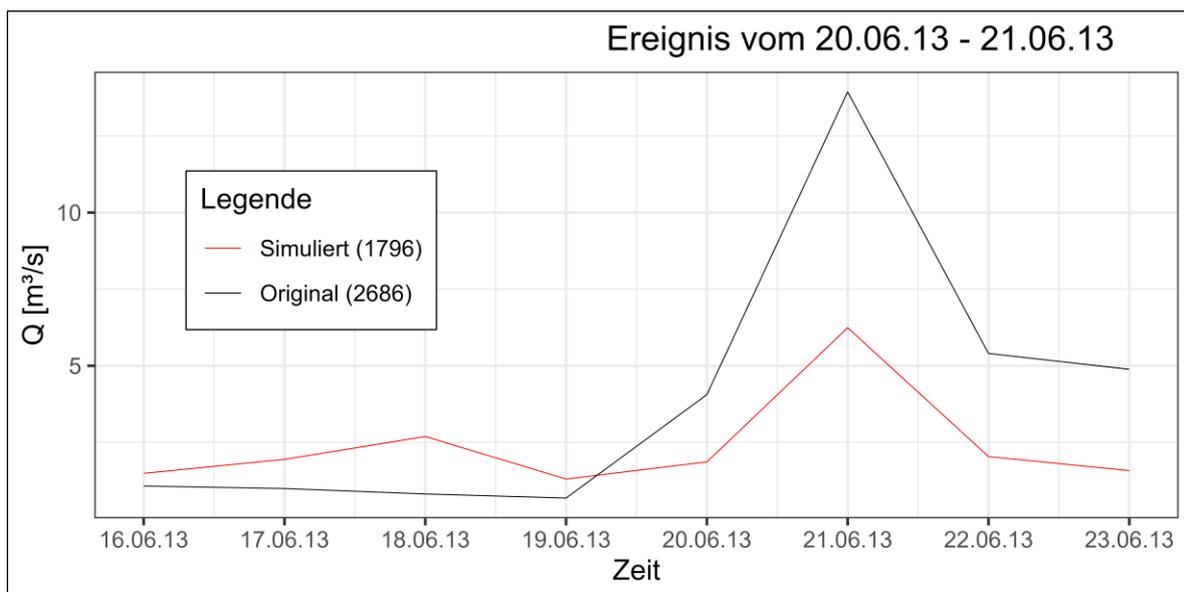


Abb. 7: Vergleich der Hochwasserscheitel zweier benachbarter Einzugsgebiete (je ein bepegeltes und unbepegeltes Gebiet) bei gleichem Ereignis (20.06.2013 - 21.06.2013)

3.2. Hochwasserwarnstufen

Für die Starkregenwarnstufen 2, 3 und 4 des DWD wurden Hochwasserwarnstufen für jedes Einzugsgebiet, welches vier oder mehr Ereignisse des CatRaRE Katalogs enthält, erstellt (4 Stufen). In 13 Einzugsgebieten wurden vier oder mehr Ereignisse aufgezeichnet. In Abbildung 8, 9 und 10 sind für die 13 Einzugsgebiete jeweils die Hochwasserwarnstufen für die DWD-Starkregenwarnstufen 2, 3 und 4 dargestellt.

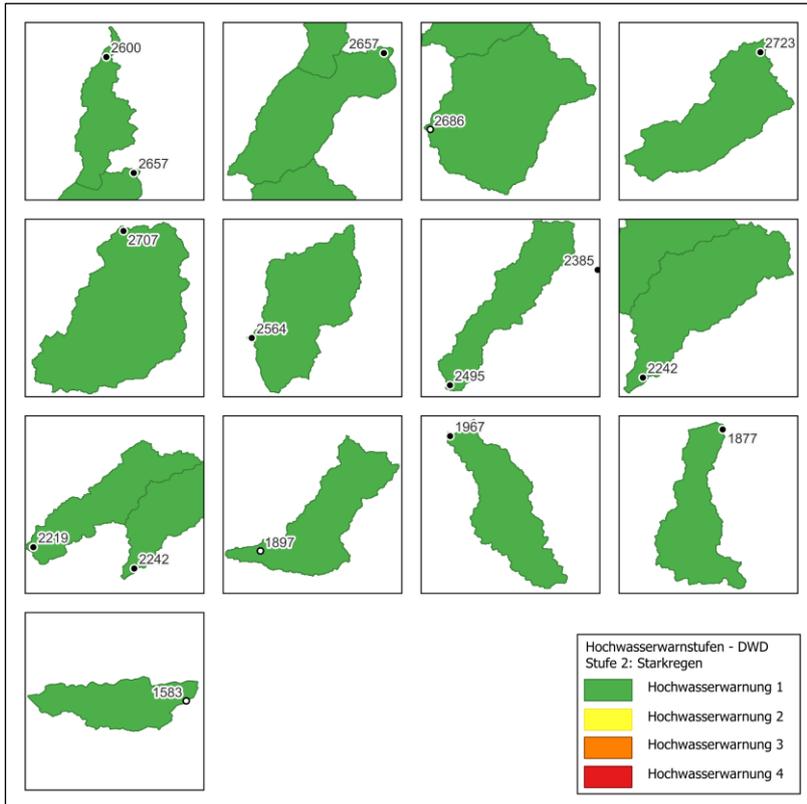


Abb. 8: Darstellung der 4 Hochwasserwarnstufen bei einer Warnung des DWD vor Starkregen (Warnstufe 2)

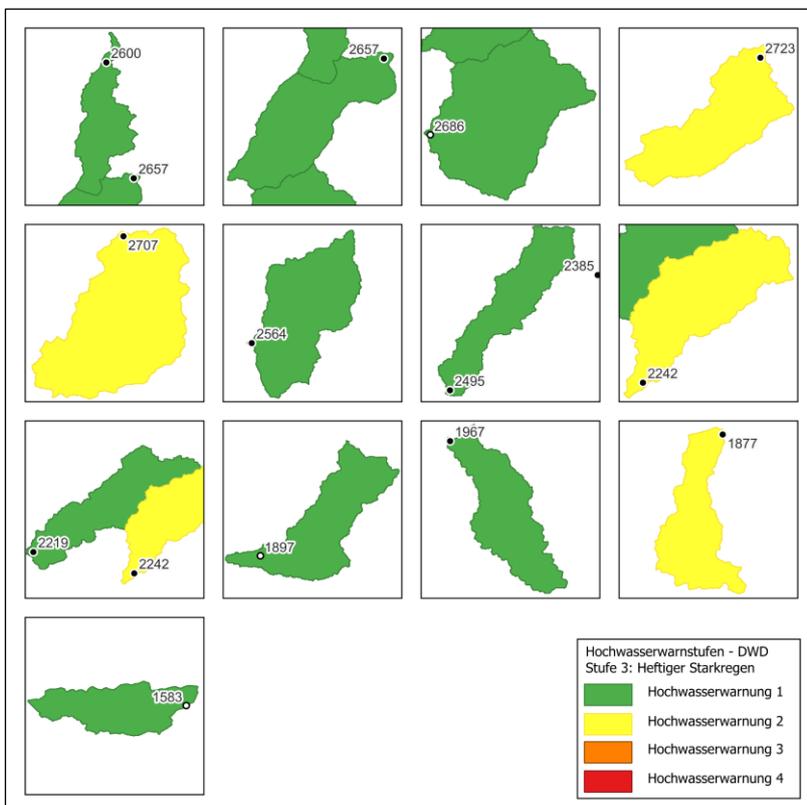


Abb. 9: Darstellung der 4 Hochwasserwarnstufen bei einer Warnung des DWD vor heftigem Starkregen (Warnstufe 3)

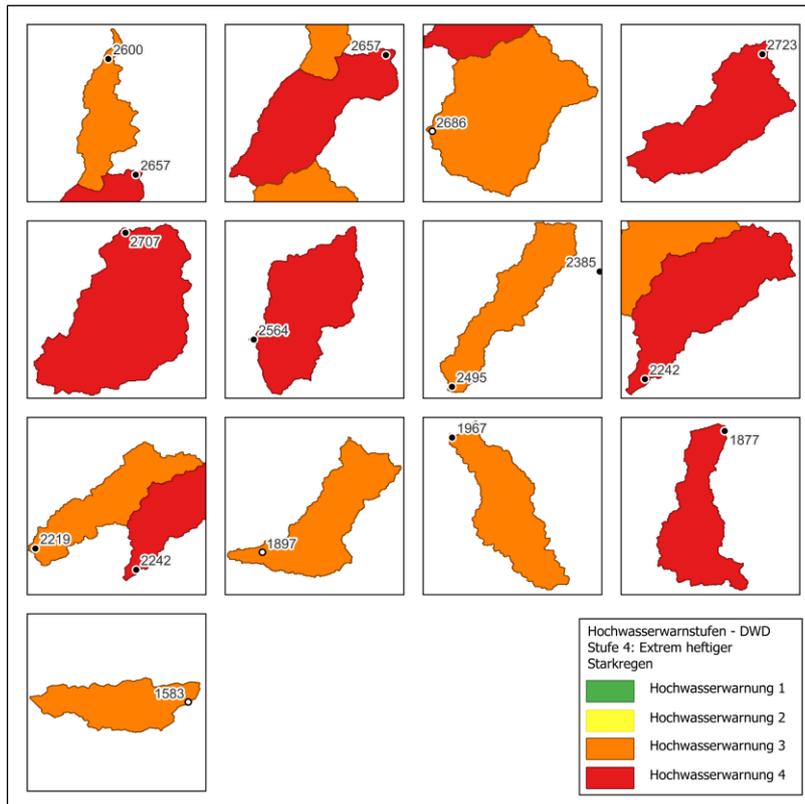


Abb. 10: Darstellung der 4 Hochwasserwarnstufen bei einer Warnung des DWD vor extrem heftigen Starkregen (Warnstufe 4)

4. Diskussion

Die Ergebnisse der Testgebiete zeigen einen NSE von 0,74 und 0,75, dies ist im wissenschaftlichen Kontext als hoher Gütegrad einzustufen. Das beweist die Leistungsfähigkeit des LSTM und legitimiert dieses. Die hohe Modelleleistung deutet zudem darauf hin, dass die hier gewählten morphometrischen, pedologischen und topografischen Merkmale Informationen enthalten, welche die Abflussmustererkennung positiv beeinflussen. Kratzert et al. (2019) ist bereits zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Durch den rein optischen Vergleich der simulierten Zeitreihen mit benachbarten (bepegelten) Einzugsgebiete bzw. deren Abflusszeitreihen, ist zu erkennen, dass sich für die Hochwasserspitzen ein plausibles Ergebnis darstellt.

Die erstellten Hochwasserwarnstufen präsentieren sich vor allem in den südöstlichen Regionen von NRW als sensibel gegenüber prognostiziertem Starkregen. Dies ist zu erwarten, da in dieser Region durch hohe Niederschlagsmengen in der Vergangenheit bereits starke Hochwasserereignisse bei gegebener Starkregenwarnung verzeichnet werden konnten.

Allerdings ergeben sich durch vereinfachte Annahmen auch Limitationen. Es werden gemittelte Tageswerte für das Training des LSTM verwendet und dementsprechend handelt es sich bei den Simulationsergebnissen auch um Tageswerte. Eine höhere zeitliche Auflösung hätte in diesem Fall einen enormen Einfluss auf die Rechenzeit gehabt. Für eine Hochwasserwarnung sollten Abflussdaten in der höchstmöglichen Auflösung verwendet werden. Zudem sollten weitere hydrometeorologische Parameter, welche die Abflussbildung beeinflussen, miteinbezogen werden. Die Bodenfeuchte wäre ein solcher Parameter.

5. Ausblick

Weitergehende Forschungen können und sollten auf Basis dieser Ergebnisse und dieses Konzeptes getätigt werden. Mit einer größeren Datenbasis und einer stärkeren Rechenleistung können signifikantere und vor allem quantitative Ergebnisse erzielt werden. Generell bietet das Gebiet der künstlichen neuronalen Netze in der hydrologischen Praxis ein großes Potenzial. Durch die Nutzung von historischen und Echtzeitdaten können LSTM-Modelle genaue Vorhersagen über Wasserstände und den Abfluss treffen und somit dazu beitragen das durch Hochwasser entstehende Risiko, besonders in kleinen Einzugsgebieten, zu minimieren.

Literatur

- Arsenault, R., Martel, J.-L., Brunet, F., Brissette, F. & Mai, J. 2023. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: long short-term memory neural networks clearly outperform traditional hydrological models [Online]. Verfügbar unter <https://hess.copernicus.org/articles/27/139/2023/>.
- Geologischer Dienst (2020) Bodenkarte 1: 50.000 | Geologischer Dienst NRW [Online], Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen. Verfügbar unter https://www.gd.nrw.de/pr_kd_bodenkarte-50000.php (Abgerufen am 11 März 2023).
- Kratzert, F., Klotz, D., Herrnegger, M., Sampson, A. K., Hochreiter, S. & Nearing, G. S. 2019. Toward Improved Predictions in Ungauged Basins: Exploiting the Power of Machine Learning, *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 12, S. 11344–11354.
- Lengfeld, K., Walawender, E., Winterrath, T., Weigl, E., Becker, A. & Deutscher Wetterdienst 2022. Starkregenereignisse Version 2022.01 mit Überschreitung der DWD-Warnstufe 3 für Unwetter basierend auf RADKLIM-RW Version 2017.002: Parameter und Polygone der Starkregenereignisse in Deutschland.
- Philipp, A. & Kerl, F 2017. Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete: Möglichkeiten und Grenzen im Lichte operationeller Anforderungen am Beispiel Sachsen, Technische Universität Dresden [Online]. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/324006829_Hochwasserfruhwarnung_fur_kleine_Einzugsgebiete_Moglichkeiten_und_Grenzen_im_Lichte_operationeller_Anforderungen_am_Beispiel_Sachsens.
- Umweltbundesamt (2022) CORINE Land Cover: CLC [Online], Umweltbundesamt. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/corine-land-cover-clc>.

Machine learning Models for flood forecasting in small catchments

Michel Spils, Sven Tomforde, Ralf Hach, Henke Hund

Zusammenfassung

Water level forecasting is an important task for both water management and flood forecasting. There are many approaches, but most either focus on very large catchments, very short forecast times, or daily instead of hourly forecasts. The objective of this paper is to develop model architectures that can accurately predict water levels for up to 48h in small catchments, using already widely available data. We test our architectures on three different gauges in Schleswig-Holstein, Germany and do a thorough comparison of hyper-parameters. We show that the resulting models and the chosen features allow an accurate prediction of water levels. One key point is the use of a DWD precipitation forecast for the catchments, which strongly improves forecasts. Additionally, the developed software makes it easy to adapt the architecture to other catchments.

1. Introduction

Forecasting flood events in small catchments is an important task made challenging by short response times. Accurate forecasts could help mitigate the loss of lives and resources in case of such natural disasters. With the rise of Big Data and steadily increasing computing power, neural networks have become an excellent method for time series forecasting (Makridakis et al. (2008)), they perform better than classical regression models on runoff forecasting (Mosavi et al. (2018)) which is highly correlated with the water level. In the last years there have been several studies on runoff and water level forecasting, but most either have a short forecast horizon (Hu et al. (2018)) or rely on data, like the CAMELS-dataset, that is not available for most locations (Kratzert et al. (2021)).

2. Methods

2.1 Data

For this study, we used publicly available data from DWD and the LfU-SH (Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein), kindly collected by the LfU-SH, to train our models. For each gauge, we use a subset of the nearest available stations measuring air temperature, air pressure, air humidity, soil moisture, evaporation, and up- or downstream water levels. Additionally, the RADOLAN (RADar-OnLine-Aneichung) precipitation, with a spatial resolution of 1x1km and an hourly temporal resolution (Bartels (2004)), for the catchment is used and potentially divided into sub-catchments. The RADOLAN precipitation is used as a synthetic precipitation forecast, by shifting it by 48 hours. Using actual precipitation forecasts would be preferable, but only a small amount of historic precipitation forecasts were available to us. When available the measured precipitation is combined with a ICON-D2 precipitation forecast.

All features are sampled hourly. During preprocessing the target water level is made stationary through differencing, which is not strictly necessary for neural networks, but can often improve model performance according to Qi & Zhang (2008). Data is standardized by removing the mean value of each feature and then dividing it by their standard deviation. This prevents features with large values from dominating features with smaller values and is done either during the preprocessing or through a normalization layer in the neural network. The input for all models is a sliding window of the last 48 to 172 hours with a stride of one.

Tab. 1: Catchment areas and dataset split.

Gauge name	Catchment size	95 th percentile	Start training set	Start validation set	Start test set	End dataset
Pötrau	92,4 km ²	1344 cm	2014-01-01	2019-09-17	2020-12-07	2022-02-27
Föhrden-Barl	458,6 km ²	254 cm	2014-01-01	2018-11-26	2019-12-14	2021-01-01
Willenscharen	484,4 km ²	274 cm	2014-01-01	2020-02-18	2021-06-12	2022-10-05

A list of all available and used features and the used training data can be found online (https://figshare.com/projects/KI-WaVo_TdH23/160511). This includes chosen models and forecasts. We inspected the gauges Föhrden-Barl at the river Bramau, Willenscharen at the river Stör, and Pötrau at the river Steinau. Table 1 shows the size and split of the datasets, Figure 1 shows the catchment area Föhrden-Barl.

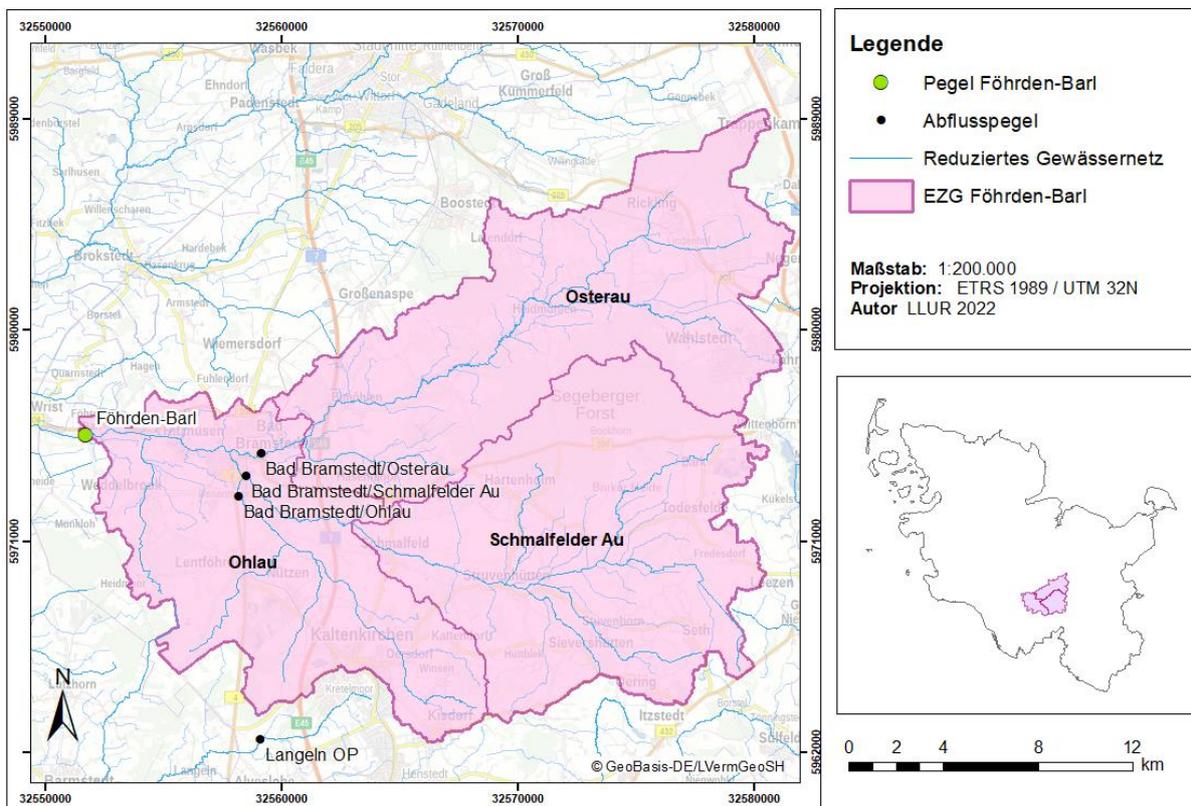


Fig.1: Catchment area Föhrden-Barl, with the sub-catchments Ohlau, Osterau, and Schmalfelder Au and their corresponding water levels and discharge rates in Bad Bramstedt

2.2 Models

After some preliminary testing classical regression algorithms like elastic net turned out to perform much worse than ANNs (Artificial neural networks), which is why we focused on 2 different ANN architectures with varying hyper-parameters implemented using TensorFlow (Abadi et al., 2015). The first is an LSTM (Long short-term memory) architecture with the basic structure shown in T 2. The tested learning rates for this architecture were 0,0005 and 0,001, the loss function was the MSE (Mean squared error) and the used optimizer was Adam (Kingma & Ba, 2014) with default values. The activation function was ReLU (rectified linear unit), except for the LSTM layers with the tangens hyperbolicus and the output layer with the linear activation function.

Tab. 2: Basic structure of LSTM models

Layer	(Hyper-) Parameters	Notes
Input	input_length, feature_count	
Normalization		Optional
LSTM Batch Normalization	lstm_nodes (32,64,128)	0-2 times
Dense Dropout	dense_nodes (32,64,128) dropout_rate (0 - 0,5)	0-2 times
Dense	forecast_horizon (48)	

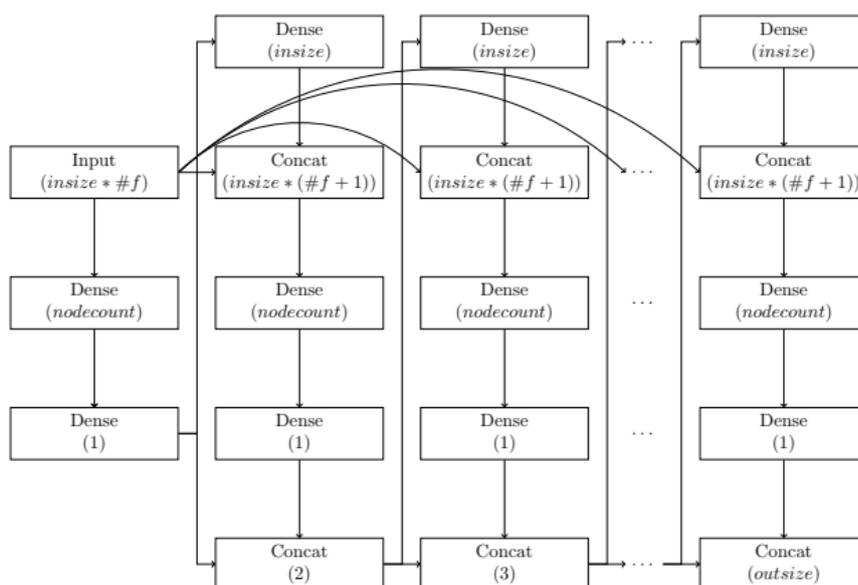


Fig. 2: Residual architecture

The second architecture was a very deep dense architecture with residual connections which circumvent the vanishing gradient problem (He et al. 2016). This residual architecture can be seen in Figure 2. The input data is used to predict a forecast for the first hour, this forecast is then used as input to another dense layer, that is concatenated with the input data as the basis for the next forecast step and so on. For this architecture the learning rate was set to 0.0005, the loss function was the MSE, the optimizer was Adam with default values, activation function was ReLU, except for the output layers, which used the linear activation function. Not pictured is a normalization layer.

Each model was trained with a batch size of 128 and used early stopping with a patience of two to reduce overfitting.

3. Results

The developed forecasting models were evaluated on independent validation and test sets. Various metrics were calculated for each experiment, but for the sake of brevity, only the MAE (Mean average error) and the NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) will be included here. The NSE of the best models with a 24h forecast horizon for the validation set was 0,944 for Pötrau, 0,983 for Willenscharen, and 0,982 for Föhrden-Barl. When considering only potential flood events, defined here as a water level above the 95th percentile at any time during the next 48 hours, the performance suffers significantly. 0,75 for Pötrau, 0,931 for Willenscharen, and 0,782 for Föhrden-Barl. These values should be taken with a grain of salt since the validation period does not contain many potential flood events. The Föhrden-Barl validation set e.g. only contains 66 timestamps above the threshold, while the equally large test set contains 661 such values. Figure 3 shows forecasts for some of the best-performing models for each gauge. The models for Pötrau and Föhrden-Barl have not seen the data for these predictions beforehand, the model for Willenscharen has seen the data.

3.1 LSTM vs Residual

Both network architectures perform well on this task, but the LSTM architecture struggles with overfitting. The performance on the training set is significantly better compared to the validation set when using the LSTM architecture. On the validation set the residual architecture either outperforms the LSTM or achieves similar results. Figure 4 shows this using the average MAE and NSE for the validation set of each gauge.

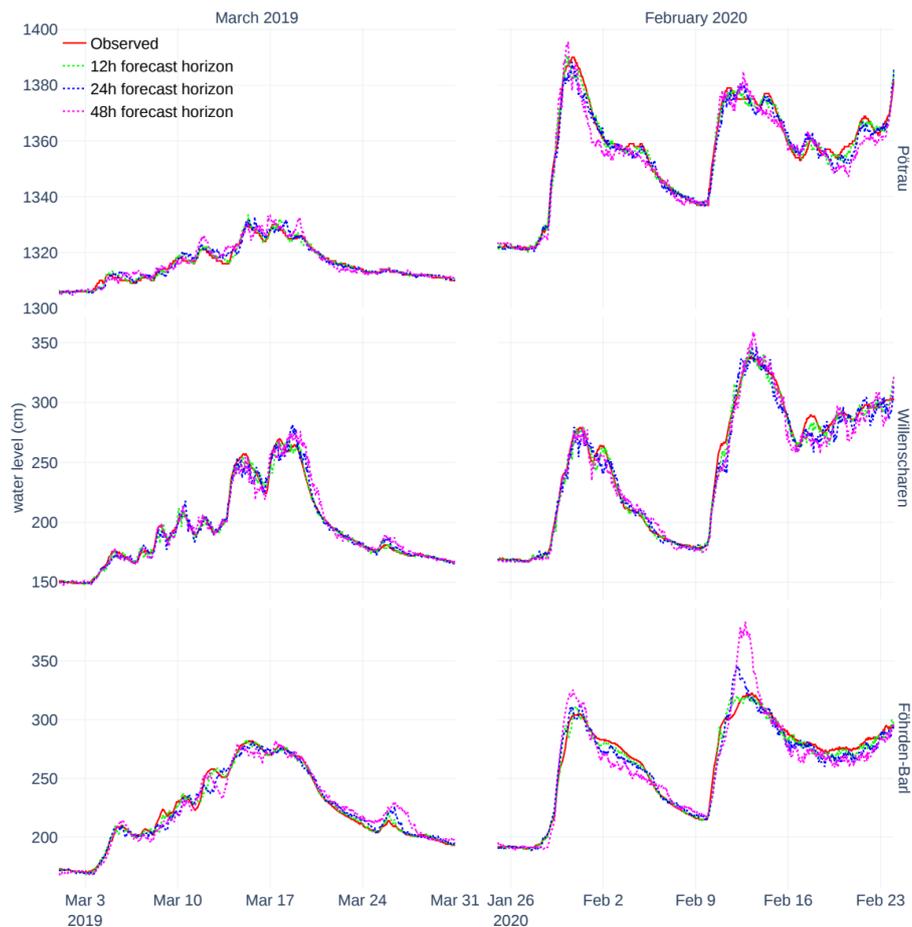


Fig. 3: 30 days of forecasts for the gauges Pötrau, Willenscharen, and Föhrden-Barl with forecast horizons of 12, 24, and 48 hours.

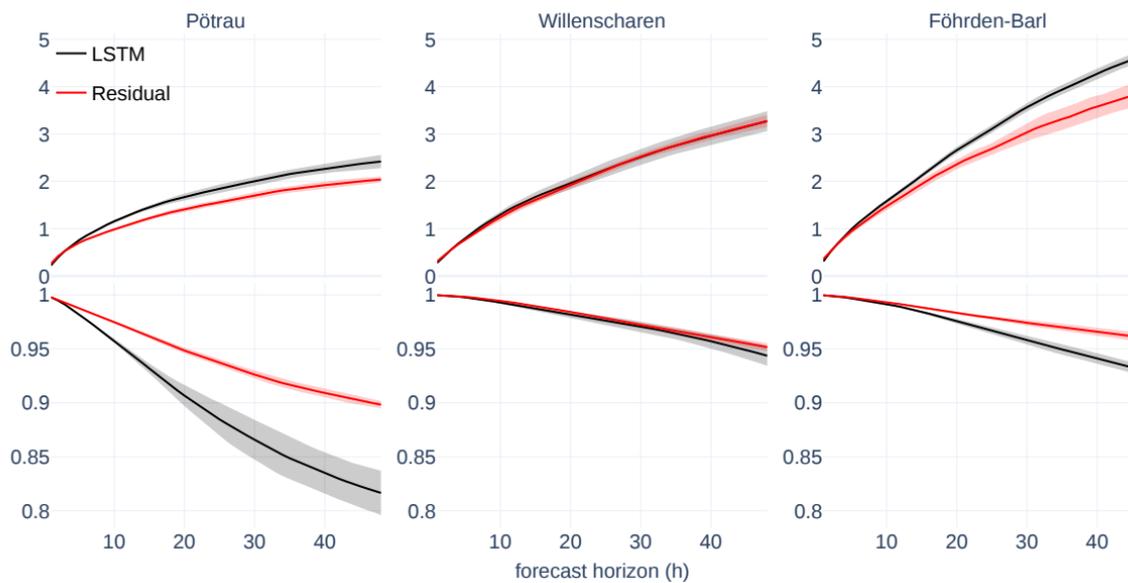


Fig. 4: Average MAE and NSE and standard deviation on the validation set for LSTM and Residual architecture split by gauge.

3.2 Use of precipitation forecast

Using the precipitation forecast as additional input unsurprisingly works very well. Figure 5 shows the MAE and NSE for models using either a synthetic precipitation forecast or the actual precipitation as one input. Without the precipitation forecast, the models do not perform well beyond a forecast horizon of about 12 hours and are always worse than the models using the precipitation forecast.

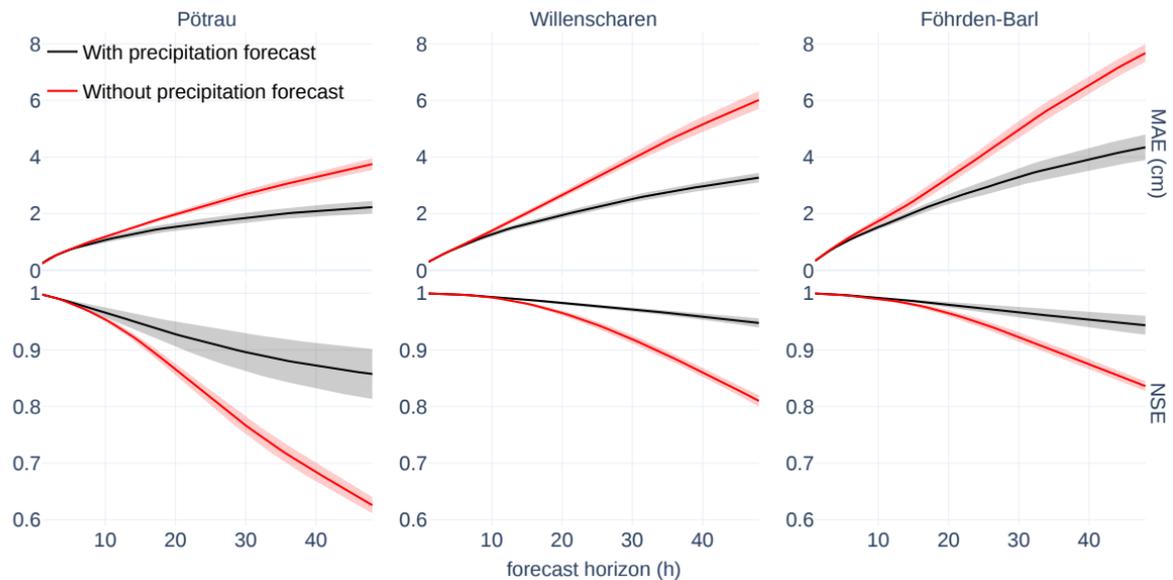


Fig. 5: Average MAE and NSE and standard deviation on the validation set for models.

Using the measured precipitation is of course not possible in a production environment since forecasts must be made before measurements are available. To verify that the approach also works reasonably well with real precipitation forecasts a model for Pötrau was run on all available ICON-D2 precipitation forecasts.

Figure 6 shows one month of daily water level forecasts using either the synthetic or the real precipitation forecast. Generating forecasts at 00:00 each day from 2021-06-24 to 2022-05-01 with 20 different models yielded very similar results using the ICON-D2 forecast, compared to the forecast generated by shifting the RADOLAN precipitation measurements. With a forecast horizon of up to 35 hours, the real precipitation forecast leads to equal or even slightly better results, visible in Figure 7.

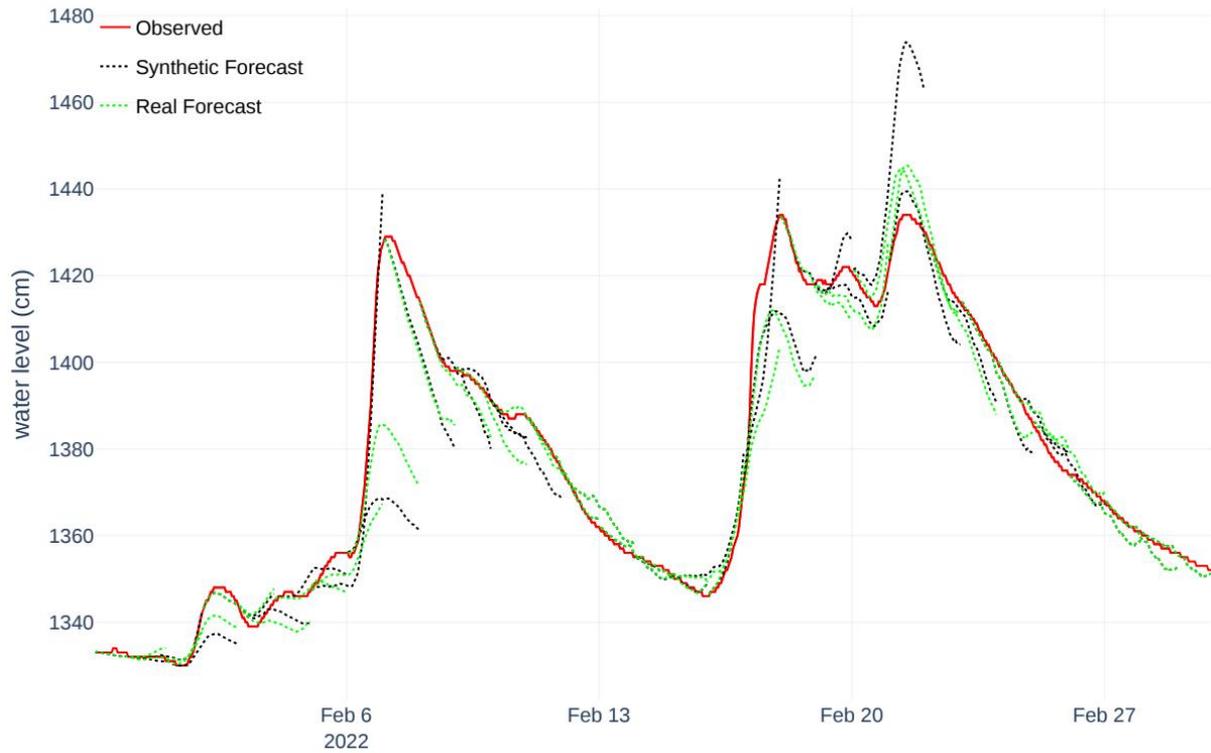


Fig. 6: Water level and forecasts for Pötrau using synthetic and real precipitation forecasts.

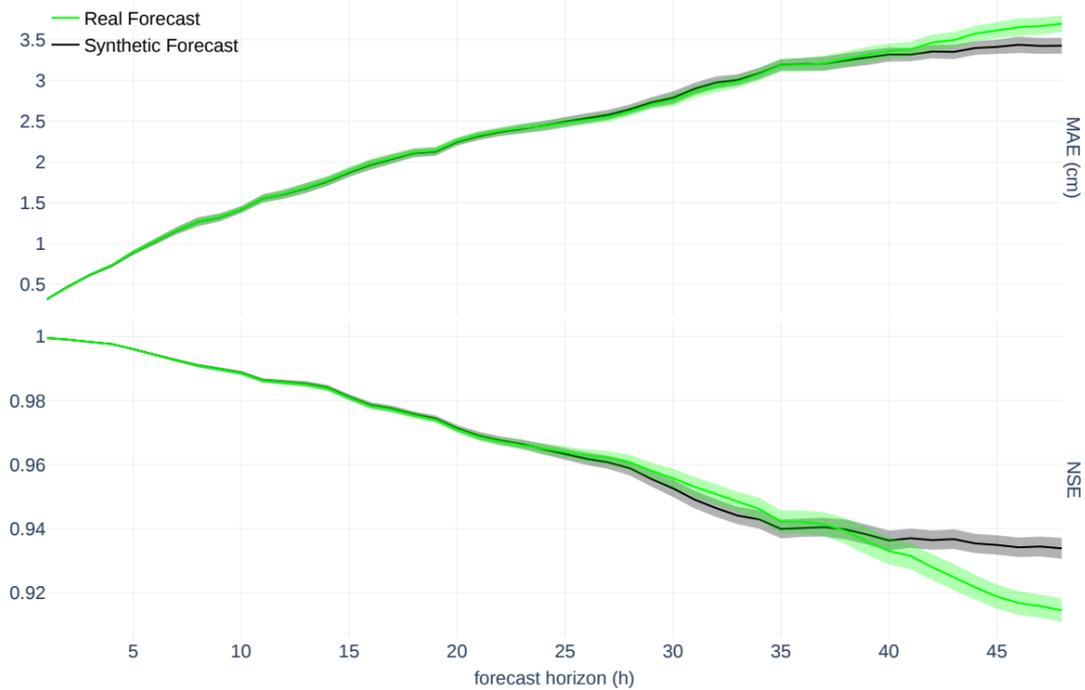


Fig. 7: Average MAE and NSE and standard deviation of forecasts for Pötrau using either a synthetic or a real precipitation forecast

4. Conclusions and outlook

This paper proposed a deep residual architecture as an alternative to standard LSTM networks for flood forecasting and tested both architectures on three different gauges. The residual architecture outperformed the LSTM architecture in many cases and suffers less from overfitting. The inclusion of precipitation forecasts for flood prediction was thoroughly tested. Using precipitation forecasts significantly improved flood forecasts, especially for forecast horizons above 12h. The use of synthetic instead of real precipitation forecasts for training purposes was tested on a single gauge and showed extremely promising results. Since synthetic precipitation forecasts can be easily generated from observed precipitation it is not necessary to have actual historic precipitation forecasts. This makes it possible to adapt models to arbitrary new locations as soon as these locations have precipitation forecasts instead of having to wait for training data to accumulate.

In future work, the use of ensemble precipitation forecasts could be explored. These ensembles have been used for flood forecasting and uncertainty communication (Grundmann et al. 2020), but their use for model training is currently unknown.

Literatur

- Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G.S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jozefowicz, R., Jia, Y., Kaiser, L., Kudlur, M., Levenberg, J., Mané, D., Schuster, M., Monga, R., Moore, S., Murray, D., Olah, C., Shlens, J., Steiner, B., Sutskever, I., Talwar, K., Tucker, P., Vanhoucke, V., Vasudevan, V., Viégas, F., Vinyals, O., Warden, P., Wattenberg, M., Wicke, M., Yu, Y., Zheng, X., TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. Software available from tensorflow.org.
- Bartels, H., 2004. Projekt RADOLAN. Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von Automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie. Offenbach, Germany
- Grundmann, J., Six, A., Philipp, A.: Ensemble hydrological forecasting for flood warning in small catchments in Saxony, Germany, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-15220, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-15220>, 2020
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., "Deep Residual Learning for Image Recognition," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 770-778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- Hu, C., Wu, Q., Li, H., Jian, S., Li, N., & Lou, Z. (2018). Deep learning with a long short-term memory networks approach for rainfall-runoff simulation. *Water*, 10(11), 1543. <https://doi.org/10.3390/w10111543>
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.
- Kratzert, F., Gauch, M., Nearing, G. et al. Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit Long Short-Term Memory (LSTM). *Österr Wasser- und Abfallw* 73, 270–280 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00767-z>
- Makridakis, S., Wheelwright, S., Hyndman, R., 2008. Forecasting methods and applications. USA: John Wiley and Sons, 2008.

- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. W. (2018). Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*, 10(11), 1536. <https://doi.org/10.3390/w10111536>
- Qi, M., Zhang, G. P., Trend Time–Series Modeling and Forecasting With Neural Networks, in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 19, no. 5, pp. 808-816, May 2008, doi: 10.1109/TNN.2007.912308.

Umgang mit Extremhochwasser im dicht besiedelten Raum - Die Roadmap Krisenhochwasser

Georg Johann, Daniela Falter, Alexander Hartung, Angela Pfister, Burkhard Teichgräber und
Adrian Treis

Zusammenfassung

Das Emscher-Gebiet, zwischen Dortmund und Duisburg und Teile des Lippe-Gebietes, zwischen Hamm und Wesel (Emscher-Lippe-Region) zeichnen sich mit seiner hohen Besiedlungsdichte durch eine hohe Vulnerabilität gegenüber Hochwasserereignissen aus. Hinzu kommt, dass infolge des Steinkohlebergbaus gefährliche potenzielle Überflutungsgebiete mit großen Wassertiefen entstanden sind. Diese Situation wird nun durch die, infolge der Erderhitzung, zunehmenden Extremniederschläge verschärft. In der Emscher-Lippe-Region wird durch Emschergenossenschaft / Lippeverband ein wasserwirtschaftlich, ökologisch, ökonomisch und sozial abgewogenes Hochwasserrisikomanagement praktiziert. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass es keine vollständig sicheren technischen Anlagen gibt. Daher sind Risikoanalyse und -bewertung wesentliche Grundlagen des nachhaltigen Hochwassermanagements. Es orientiert sich dabei an den im gesellschaftlichen Konsens entwickelten Hochwasserschutzzielen. Hochwasserrisikomanagement ist eine Gemeinschaftsaufgabe, mit der integrative Maßnahmen die Hochwasser-Resilienz der Gesellschaft stärken. Hierzu ist mit der Initiierung des Programms „Roadmap Krisenhochwasser“ ein zukunftsfähiger Handlungsrahmen geschaffen worden. Dabei zeigt sich, dass neben den Hochwasserschutzeinrichtungen, die Flächenverfügbarkeit, die Warnung, die Kommunikation und Kooperation, sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen ebenso wichtige als auch kritische Handlungsfelder sind.

1. Gebietscharakteristik, Hochwasser-Gefahr und -Risiko in der Emscher-Lippe-Region

Emschergenossenschaft und Lippeverband (EG/LV) sind als regionale Träger der Wasserwirtschaft für ein 4.100 km² großes Gebiet mit 3,7 Mio. Menschen zuständig. Nach ihren Verbandsgesetzen sind EG und LV für die Regelung des Wasserabflusses einschließlich Ausgleich der Wasserführung und Sicherung des Hochwasserabflusses verantwortlich. Die Verbindung von Planung, Bau und Betrieb ganzer Flussgebiete oder -abschnitte führt zu mannigfaltigen Synergien sowie zu einem integrierten Hochwasserrisikomanagementkonzept.

Die Aufgaben des Hochwasserrisikomanagements haben bereits historisch bedingt einen hohen Stellenwert. Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte sich aus einer dünn besiedelten Agrarlandschaft im Emscher-Gebiet, zwischen Dortmund und Duisburg und in Teilen des Lippe-Gebietes, zwischen Hamm und Wesel (Emscher-Lippe-Region), ein von Bergbau und Schwerindustrie geprägtes Gebiet. Aus mäandrierenden Tiefland-Flüssen und -Bächen wurden begradigte, vielerorts von Deichen gefasste Abwasserläufe. Dieser technische Umbau, der durch leistungsfähige Hochwasserschutzsysteme gekennzeichnet ist, machte den Weg frei für die Entstehung einer der größten Metropolregionen Deutschlands (Grün & Johann, 2012). Wohnquartiere, Gewerbegebiete und industrielle Anlagen entstanden in den geschützten Gebieten des Deichhinterlands und rückten oftmals direkt hinter die Deichlinie. Das industrielle Wachstum der Region erfolgte auf Kosten eines erhöhten Hochwasserrisikos im Deichhinterland. Diese gewässernahe Bebauung prägt heute weite Teile der Emscher-Lippe-Region. Zahlreiche Hochwasserschutzanlagen wurden Anfang des 20. Jahrhunderts nach den damals höchsten abgelaufenen Hochwasserereignissen dimensioniert (Emschergenossenschaft, 1925). Mit Hilfe der heute vorliegenden hydrologischen und hydraulischen Simulationsmodellen und den langen Messzeitreihen von Niederschlags- und Klimadaten können die

Hochwasser-Schutzanlagen durch statistische Analysen einem Ausbaugrad zugeordnet werden, sie sind stellenweise bis auf ein 250-jährliches Ereignis ausgebaut. Emschergenossenschaft/Lippeverband haben in 2003 ein Hochwassermanagementkonzept erstellt, das 2016 zu einer Hochwasserrisikomanagementstrategie weiterentwickelt wurde (Johann et al., 2019). In diesem Rahmen werden neben dem sicheren Betrieb der technischen Anlagen auch klassische Nachhaltigkeitsziele der Ökonomie und Ökologie verfolgt. Die Kernziele der Bewirtschaftung sind eingeordnet in eine soziale Verantwortung für die Region und die Schonung von Umwelt- und Naturressourcen. Dies kann am besten auf der Grundlage einer Risikoanalyse und -bewertung umgesetzt werden. Sie orientieren sich beim Hochwasserrisikomanagement (HWRM) an den im gesellschaftlichen Konsens entwickelten Hochwasserschutzzielen.

Durch die Nordwanderung des Bergbaus und das damit verbundene Ende der Bergsenkungen wurde es Anfang der 1990er-Jahre möglich, die technisch geprägten Gewässersysteme naturnah umzubauen. Die Gewässerumgestaltung korrespondiert abermals mit einem sozialökonomischen Strukturwandel. Der Umbau bietet große Chancen für die von sozialen Problemen stark betroffene Region, die mit der Aufgabe kämpft, den Übergang von der montanindustriellen Vergangenheit in eine von Hochtechnologie und Dienstleistung geprägte wirtschaftliche Zukunft gut zu bewältigen (Heiser et al., 2015). Mit diesem ökologischen Gewässerumbau können Hochwasserabflüsse wesentlich gedämpft werden (Johann & Frings, 2016). Darüber hinaus mindert die Zukunftsinitiative Klima.Werk mit Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung die nachteiligen Wirkungen der Verstädterung auf den lokalen Wasserhaushalt und das Kleinklima. Jedoch können mit solchen Maßnahmen die Herausforderungen des Klimawandels, mit der Zunahme von Extremereignissen, nicht kompensiert werden. Das betrifft zum einen Dürre-Ereignisse, zum anderen in Häufigkeit und Intensität zunehmende Starkregenerereignisse (Pfister, 2016), die im stark versiegelten Einzugsgebiet zu erhöhten Hochwasserabflüssen führen (Fischer & Johann, 2021). In diesem Kontext gilt es, die Starkregen- und Hochwasser-Resilienz stetig weiterzuentwickeln. Die Juli-Flut 2021 hat gezeigt, wie notwendig das ist (Schüttrumpf et al., 2022).

2. Umgang mit Hochwasserschutzanlagen und Hochwasserrisikomanagement in Zeiten des Klimawandels

Hochwasserschutzanlagen werden auf der Grundlage von gemessenen Daten aus der Vergangenheit dimensioniert. Entweder werden Hochwasserschutzanlagen direkt über die Jährlichkeit bemessen, oder über eine Kostenwirksamkeit, bei der das Schadenspotenzial der Hochwasser-Auftrittswahrscheinlichkeit gegenübergestellt wird. Die historischen Daten enthalten jedoch nur zum Teil den Einfluss der klimawandelbedingten Veränderungen. Kurz gesagt, die Unsicherheit der Hochwasserstatistik hat, in Bezug auf die Instationarität der gemessenen Daten, mit dem Einsetzen des Klimawandels zugenommen (Schumann, 2021). Zumal nun auch eine immer mehr dynamische Veränderung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit von Hochwasser-Ereignissen in Zeiten des Klimawandels erwartbar ist (Robinson et al., 2021). Folglich steht die Dimensionierung von Hochwasserschutzanlagen auf der Grundlage von Jährlichkeiten allein rein systemisch zur Disposition.

Auch die Verwendung von Klimaprojektionen für die Dimensionierung von Hochwasserschutzanlagen ist bisher noch nicht geübte Praxis. Viele Modelle zeigen zwar eine gemeinsame

Richtung, wie das Auftreten von Hochwasserextremereignissen sich entwickeln werden können, jedoch wissen wir alle nicht, wie sich die Treibhausgas-Emission und damit die Hochwasser-Charakteristik entwickeln werden (Umweltbundesamt, 2022). Wie also umgehen mit der zukünftigen Hochwassergefahr?

Bei der Anpassung an das zukünftig veränderte Niederschlagsverhalten kommen grundsätzlich mehrere Wege in Betracht, die hier schlaglichtartig ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgeführt sind: Ein Weg setzt maßgeblich auf die Steigerung des Abflussvermögens (meist Deiche und Hochwasserrückhaltebecken). Dieser Weg wird von manchen Institutionen in Europa gegangen, beispielsweise mit einer 15 %igen Vergrößerung der Hochwasserschutzanlagen bei der Deicherhöhung oder der Vergrößerung von Hochwasserrückhaltebecken (KLIWA, 2018).

Ein weiterer Weg verfolgt die Umsetzung von naturbasierten Maßnahmen, die erstens die Abflussbildung durch Nutzungsänderungen im städtischen und ländlichen Raum verlangsamen und zweitens die Dämpfung der Hochwasserwelle durch Gewässerumgestaltungen (DWA, 2010). Damit wird bei gleicher Jährlichkeit der Abfluss gedämpft. Eine wesentliche Bedingung für die Realisierbarkeit solcher Maßnahmen ist die Flächenverfügbarkeit. Die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen greifen somit in die Stadt- und Raumplanung ein. Kooperation und Kommunikation sind hier folglich für eine erfolgreiche Umsetzung entscheidend.

Desweiteren gibt es die Möglichkeit Hochwasserschutzanlagen robust zu machen für Ereignisse, die das Bemessungsereignis übersteigen. Dazu zählt der überströmungssichere Ausbau von Deichen (Baumgartner, 2015). Im HWRM ist es bisher nur selten üblich, über die Bemessungsgrenze hinaus nachzudenken, oftmals werden in den HWRM-Plänen lediglich Maßnahmen für Ereignisse bis zum HQ_{100} vereinbart (z. B. HWRM-Pläne in NRW - MUNV NRW, 2021). Maßnahmen und Konzepte für Ereignisse oberhalb der Bemessungsgrenze mitzudenken, hat Auswirkungen auf die Stadt- und Raumplanung und sicherlich auch auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen. Nach dem Wasserhaushaltsgesetz § 78 sollte zwar möglichst nicht in „Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten“ gebaut werden und wenn, dann wenigsten Hochwasser angepasst. Jedoch ist das keine „muß“ Bestimmung.

Und dies, obwohl mit der Zunahme von Extremniederschlägen infolge der Erderhitzung, Hochwasserereignisse wahrscheinlicher werden, die die Hochwasserschutzanlagen an ihre Grenzen und darüber hinaus bringen können.

Deshalb kommt der Hochwasserwarnung, auch für geschützte Gebiete, eine immer wichtiger werdende Bedeutung zu. Diese Warnung, die systemimmanent stets Unsicherheiten beinhaltet, muss von den Entscheidern richtig verstanden werden können und zu adäquaten Handlungen führen. Hier sind wiederum Kooperation und Kommunikation die kritischen Pfade. Dies gilt auch für Vorsorgemaßnahmen wie die Sensibilisierung der betroffenen Bevölkerung und Informationen zum richtigen Verhalten und zu geeigneten Fluchtwegen in akuten Überflutungssituationen.

Mit dieser relativ kurzen Darstellung wird deutlich, dass beim HWRM in Zeiten des Klimawandels immer mehr Kooperation und Kommunikation mit entsprechend veränderten gesetzlichen und politischen Rahmenbedingungen notwendig werden.

3. Programm „Roadmap Krisenhochwasser“ für ein zukunftsfähiges Hochwasserrisiko-management

Die Hochwasserschutzsysteme in der Emscher-Lippe-Region sind gemäß den gesetzlichen Vorschriften nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden ausgelegt (Johann, 2023). Dennoch können extreme Niederschlagsereignisse zu extremem Hochwasser führen. Hier müssen weiter gehende Maßnahmen initiiert werden, die im Programm „Roadmap Krisenhochwasser“ zusammengeführt sind (Emschergenossenschaft/Lippeverband, 2022). Die Ziele der Roadmap Krisenhochwasser sind die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit bis zur maximalen Belastbarkeit der Hochwasserschutzsysteme, im Katastrophenfall der Schutz von Leib und Leben der Bevölkerung, sowie die Minimierung von Umwelt- und Sachschäden. Zur Stärkung der Hochwasser-Resilienz im Klimawandel decken dabei die fünf Aktionsfelder der Roadmap Krisenhochwasser alle notwendigen Handlungsfelder ab. Mit der parallelen Initiierung zahlreicher Projekte in diesen Aktionsfeldern möchte EGLV vor dem Extremhochwasser handeln:

I. Schaffung zusätzlicher Retentionsräume

Wenn die Hochwasserwelle an geeigneter Stelle zurückgehalten werden kann, steht weniger Wasser für die Überflutung vulnerabler Bereiche zur Verfügung, und Schaden kann gemindert oder gar ganz verhindert werden.

II. Anpassung an Extremereignisse

Extrem-Hochwasserereignisse können die Leistungsfähigkeit der Schutzmaßnahmen übersteigen. Auch auf diesen Fall sollen die Hochwasserschutzanlagen angepasst sein, um ein Totalversagen mit großen Schäden zu vermeiden. Dazu werden Deichabschnitte überströmungssicher ausgebaut. Die Deiche bekommen einen zusätzlichen Klimazuschlag von 20 cm auf das Bemessungshochwasser, doch ändert sich nicht der statistisch festgelegte Ausbaugrad.

III. Hochwasserwarnung - Next Level

Die Zunahme von Starkregen führt dazu, dass Hochwasserereignisse immer schneller ablaufen. Aus diesem Grund wird die Hochwasservorhersage zeitlich höher diskretisiert (alle 15 Min. eine neue Vorhersage). Auch wird sie von der Emscher auf weitere Nebenläufe und Pumpwerke ausgedehnt, dazu wird das Pegel-Messnetz erweitert.

IV. Stärkung von Kommunikation und Kooperation

Hochwasser-Vorsorge und -Bewältigung sind eine Gemeinschaftsaufgabe mit verteilten Zuständigkeiten. Ziel ist es, die gemeinsame Kommunikation zu verbessern und bei der Realisierung von Risikomanagement-Projekten zu unterstützen. Dazu werden z.B. die Hochwasservorhersage-Informationen auf ein Portal für Kommunen und Träger öffentlicher Belange und für die Bevölkerung bereitgestellt.

V. Politischer Rahmen

Die Initiativen der Emschergenossenschaft für Hochwasserereignisse über dem Bemessungsabfluss haben einen ausreichenden rechtlichen Rahmen. Jedoch sollen notwendige Vorschläge für die Verbesserung weiterer gesetzlicher und politischer Rahmenbedingungen auf Bundes- und Landesebene in den politischen Prozess eingebracht werden.

Dies bedeutet, dass innerhalb der Bemessungsabflüsse unsere Hochwasserschutzanlagen in Ordnung sind. Das Hochwasserrisikomanagement berücksichtigt nun auch Gefahren bei einer Überschreitung der Bemessungsabflüsse. Hierfür müssen gesetzliche Grundlagen geschaffen werden. In der Katastrophenwarnung sollte „Wasser“ als eigener Katastrophenfall integriert werden. Hier sollten zum Beispiel auch Sirenenwarnsysteme etabliert werden.

In den Aktionsfeldern werden zahlreiche Projekte umgesetzt, die im Folgenden aufgeführt sind:

I. Schaffung zusätzlicher Retentionsräume

Zusätzliche Retentionsräume identifizieren und sichern

Es existieren in der Emscher-Lippe-Region Deich-Abschnitte, deren Deichhinterland land-/forstwirtschaftlich genutzt sind. Diese sollen bei Hochwasserereignissen, die größer sind als das Bemessungshochwasser, als sogenannte Notpolder dienen. Somit wird Wasser, das sonst bebaute Gebiete überfluten würde, sicher zurückgehalten. Dafür müssen die in Frage kommenden Flächen für diese Nutzung zur Verfügung stehen (Kauf, Pacht oder andere Vereinbarungen mit dem Flächeneigentümer). Erste Untersuchungen haben ergeben, dass rund 502ha unbebaute Gebiete an 25 Standorten als Notpolder genutzt werden könnten. Zur Absicherung bebauter Gebiete gegenüber den Notpoldern müssen rund 17,5 Kilometer neue Deiche gebaut werden.

Neue Emscher-Auen herstellen

Zwischen Dortmund und Recklinghausen fließt die Emscher tief ins Gelände eingeschnitten. Wenn die Auenbereiche auf die Geländehöhe der Emscher gebracht werden, stünde über eine Million m³ Retentionsvolumen zur Verfügung. Es handelt sich hier um unbebaute Flächen, die zum Großteil der Emschergenossenschaft gehören. Diese Maßnahme dämpft die Hochwasserwelle und senkt die Überflutungsfahr. In diesen Emscher-Abschnitten kann auch eine ökologisch wertvollere Emscher entstehen. Die Auen liefern dann auch zahlreiche Ökosystemleistungen, wie Hitzereduktion, Erhöhung der Verdunstung, Stickstoff-Elimination und vieles mehr.

Notwasserwege identifizieren und sichern

Notwasserwege dienen dazu, oberflächlich abfließendes Wasser durch Starkregen gezielt so abzuleiten, dass ein möglichst geringer Schaden (Erosion und Gebäudeschäden, etc.) verursacht wird. In der Regel kommen für die Anlage von Notwasserwegen in urbanen Gebieten der öffentliche Verkehrsraum und öffentliche Grünflächen, aber auch Flächen privater Eigentümer in Frage. Bei der Identifikation und Sicherung von Notwasserwegen und multifunktionalen Retentionsräumen ist eine enge Abstimmung mit Flächeneigentümern und kommunaler Verwaltung vorgesehen. Die vorsorgliche Planung und Umsetzung von Notwasserwegen, Retentionsräumen weit ab vom Gewässer und die mit EGLV abgestimmte Einleitung von Regenwasser in Gewässer führt zur Dämpfung der Hochwasserwelle und somit zur Senkung der Hochwassergefahr.

II. Anpassung an Extremereignisse

Verbesserung des Hochwasserschutzes

EGLV prüfen die Möglichkeit, Deiche um einen Klimafolgeschlag von z.B. 20 cm auf die Bemessungswasserspiegellage zu erhöhen. Selbstverständlich ist die hydrologisch-hydraulische Wirkung von Deichabschnitt zu Deichabschnitt unterschiedlich. Diese Wirkung ist abhängig vom Abfluss des Bemessungshochwassers, jedoch auch von hydraulischen Kriterien, wie Querschnittsfläche und Sohlgefälle, oder gar Rückstaueffekte. Bei der Wahl der Höhe des Klimazuschlags müssen Aspekte wie Deichstandsicherheit oder Deichanschlüsse an Brücken und vieles mehr, hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Wirkung bewertet werden.

Stresstest

Das Hochwasserschutzsystem im EGLV-Gebiet wird einem Stresstest unterzogen. Dabei werden mit extremen Niederschlägen NA-Simulationen durchgeführt und Gewässerabschnitte identifiziert, an denen es zu Überschwemmungen kommt. Dafür müssen die NA-Modelle aufbereitet werden, indem die Leistungsfähigkeit der Gewässerabschnitte und die Retentionswirkung von Überschwemmungen im Modell abgebildet werden. Die Modelle wurden bisher mit Ereignissen bis zum Bemessungsfall belastet und mussten diese Eigenschaften nicht aufweisen.

Es werden dabei Niederschläge über dem Tn1000 verwendet, da in den letzten Jahren schon oft Niederschläge größer Tn1000 gefallen sind. Beispielsweise beträgt ein Tn1000 im Emschergebiet maximal rund 100 mm/6h. Doch wurden schon häufiger Niederschläge über 200mm gemessen. Deshalb werden unabhängig von der Jährlichkeit Niederschlagshöhen als Szenarien gewählt wie z. B. 250 mm/6h für das gesamte Emschergebiet.

Auf dieser Grundlage werden Maßnahmen wie beispielsweise die Überströmungssicherung von Deichen und der Umgang mit eintauchenden Brücken entwickelt.

Überströmsicherung von Deichen

Hochwasserschutzanlagen können überflutet werden, wenn ein Hochwasserereignis wesentlich größer als die Bemessung der Anlage ist. Hochwasserrückhaltebecken besitzen deshalb schon heute befestigte Entlastungsbauwerke, damit das Bauwerk in einem solchen Fall stand sicher bleibt. Diesem Prinzip folgt auch das Vorhaben, Deichabschnitte überströmungssicher auszubauen.

Eintauchende Brücken anpassen

Schon heute tauchen Brücken beim Bemessungshochwasser in das abfließende Wasser ein. Dies sorgt dann für Rückstau und hohe Wasserspiegellagen oberhalb der Brücke. Darüber hinaus kann an eintauchenden Brücken Treibgut hängen bleiben, was zu einer Verklauung des Brückendurchlasses führen kann. Dies kann wiederum zu noch mehr Rückstau und Überflutungen im Bereich der Brücke führen. EGLV werden gemeinsam mit den Kommunen Maßnahmen gegen diese Gefahr realisieren.

Pumpwerke gegen Überflutung sichern

Bei EGLV werden über 300 Pumpwerke betrieben, da das Einzugsgebiet durch Bergesenkungen durch den Steinkohlebergbau geprägt ist. Die Grundlagen zur Sicherung der Pumpwerke liegen mit Risikostudien und Einstauchecks vor. Die Umsetzung der aus den Einstauchecks resultierenden Maßnahmen wurde initiiert. Es werden Einstauchecks für Pumpwerke zukünftig wiederkehrend alle fünf Jahre durchgeführt und notwendige Maßnahmen ergriffen.

Objektschutzmaßnahmen mit dem Hochwasser-Pass

Anlagen zur Abwasserbehandlung und Klärschlammabeseitigung sowie Bauhöfe werden in Hinblick auf Objektschutz untersucht und ertüchtigt. Auch die Wohngebäude von EGLV werden mit dem Hochwasser-Pass ausgestattet und ggf. Objektschutzmaßnahmen durchgeführt.

III. Hochwasserwarnung – Next Level

Hochwasservorhersage beschleunigen (15 min Intervalle)

Als eine der ersten Maßnahmen wurde die Modelltaktung des Vorhersagemodells für die Emscher von 30 auf 15 Minuten erhöht. Es zeigt sich, dass die 30-minütige Taktung die hochdynamische Entwicklung an der Emscher nicht adäquat abbilden konnte. Zusätzlich werden Pegel- und Niederschlagsdaten alle 5-Minuten übertragen.

Vorhersage auf weitere Nebengewässer ausdehnen

Neben Emscher und Lippe sollen auch vertiefte Hochwasserwarnungen für die größten Nebenläufe gegeben werden können. Dafür müssen die Nebenlauf-Modelle für die Hochwasservorhersage aufbereitet werden. Die weiteren Modelle benötigen für das Hochwasservorhersagesystem entsprechend mehr Serverkapazität.

Pegelnetz an Nebengewässern ausbauen

Um für die Nebenläufe Hochwasserwarnungen abgeben zu können, muss auch der aktuelle Abfluss und Wasserstand bekannt sein, deshalb werden 30 zusätzliche Pegel im EGLV-Gebiet gebaut. Die zusätzliche Verdichtung des Pegelnetzes durch Wasserstandmessungen an Brücken wurde zum Teil als Sofortmaßnahme direkt umgesetzt. Damit betreibt EGLV zukünftig rund 130 Pegel, die in unterschiedlichen Kategorien auch vollständig hochwasserresilient ausgelegt werden.

IV. Kommunikation und Kooperation

Aufbau einer gemeinsamen Kommunikationsplattform

In zahlreichen Workshops mit den kommunalen und den gewerblichen Mitgliedern von EGLV wurde festgestellt, dass eine gemeinsame Plattform für einen standardisierten Informationsaustausch im Hochwasserfall erforderlich ist. EGLV werden die Plattform aufbauen und betreiben. Anwender werden neben EGLV und ihren Mitgliedern die Wasserbehörden und Katastrophenschutzbehörden sein. Hinzu kommen Bezirksregierungen und Landes-Institutionen. Die Anwendung wird in gemeinsamen Krisenstabsübungen trainiert.

Hochwasserzentrale von EGLV und die Krisenstäbe der Kreise/Städte synchronisieren

Die Hochwasserzentrale von EGLV und die Krisenstäbe der Kreise/Städte werden synchronisiert. Dabei wird gemeinsam herausgearbeitet, ab wann (z. B. zu Beginn oder in Erwartung einer Großeinsatzlage) und wie während des Ereignisses zwischen EGLV, Gefahrenabwehrbehörden und Krisenstäben kommuniziert wird.

Schutzkonzept für Polder mit Bevölkerungsgefährdung und Gefahr für kritische Infrastruktur initiieren

Die Bevölkerung, die in hochwassergefährdeten Gebieten, hinter Deichen oder neben Pumpwerken lebt, muss über die Gefahr vor und während eines Ereignisses informiert werden. Und zwar nicht nur über die Überflutungsgefahr, sondern auch darüber, was bei einer Überflutung zu tun ist. Dazu wird von EGLV, den Kreisen und Städten ein gemeinsames Kommunikations-

sowie Handlungskonzept entwickelt. Bei den Kreisen und Städten verbleiben die gesetzlichen Pflichten (wie zum Beispiel: Bildung des Krisenstabes, Information an die Bevölkerung, etc.) und die Kommunikation zur Bevölkerung zum Thema Sensibilisierung und Eigenvorsorge.

V. Politischer Rahmen

Neben der Erarbeitung der „Roadmap Krisenhochwasser“ haben sich EGLV an zahlreichen Initiativen der wasserwirtschaftlichen Interessenvertretungen beteiligt (DWA, VKU, BDEW, AÖW, agw etc.) und sich vor allem für die folgende Punkte stark gemacht:

- Ausweisung von Notfallpoldern und potentiell gefährdeten Gebieten in der Regionalplanung
- Beschleunigte Genehmigungsverfahren bei No-Regret-Maßnahmen
- „Klimawandelzuschlag“ für Deichhöhen einplanen
- Verpflichtung für Abwasserbeseitigungspflichtige, vorhandene Beratung zum Thema Rückstau auf Starkregen und Hochwasser zu erweitern
- Erstellung von Starkregengefahrenkarten verpflichtend machen und mit Hochwasserisrikokarten verbinden
- Höhere Hürden zur Hochwassersicherheit von Neubaugebieten einführen (über ein hundertjährliches Hochwasserereignis hinaus)

Literatur

- Baumgartner, E. (2015): Sanierung Hagneckkanal - Notfallplanung für die Bewältigung des Überlastfalls Amt für Wasser und Abfall Kt. Bern Beitrag zur Fachtagung vom 20. August 2015 Bezug: www.be.ch/hagneckkanal
- DWA (2010): Merkblatt DWA-M 550 Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Hennef
- Emschergenossenschaft (1925): 25 Jahre Emschergenossenschaft (Hrsg.: Helbing, H.). Essen
- Emschergenossenschaft/Lippeverband (2022): Roadmap Krisenhochwasser. <https://www.presse-service.de/data.aspx/medien/242870P.pdf>
- Fischer, S. & Johann, G. (2021): Identifikation der Veränderung von Hochwassertypen durch Zunahme von Starkregen und Änderungen im Einzugsgebiet. In: HKC-Werkstattbericht Umgang mit hydrologischen Bemessungsgrößen in Zeiten des Klimawandels. <https://www.hkc-online.de/de/Projekte/HKC-Werkstattbericht>
- Grün, E. & Johann, G. (2012): Hochwassermanagement im urbanen Umfeld. Tagungsband 42. Internationales Wasserbausymposium Aachen (IWASA), 2012, Aachen.
- Heiser, T., Johann, G. & Schumacher, R. (2015): Wirksame Steuerungsgrößen im integrierten Hochwassermanagement - wie können sie gefunden werden? In: Tag der Hydrologie 2015, Bonn.
- Johann, G. (2023): Hochwasserschutzanlagen im Emscher-Gebiet. In: Wassertage Münster 2023. Wird noch veröffentlicht.
- Johann, G., Pfister, A. & Teichgräber, B. (2017): Hochwasservorhersage für die Deichverteidigung im Emscher- und Lippegebiet. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 10/17, S. 641ff

- Johann, G. & Frings, H. (2016): Hochwasserrisiko mindern und Ziele des Gewässerschutzes erreichen - geht das? Ein Praxisbeispiel: die ökologische Verbesserung des Gewässersystems der Emscher. In: 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016
- KLIWA (2018): Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B. Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft ISBN: 978-3-88251-400-1.
- MUNV NRW (2021): Hochwasserrisikomanagementpläne für NRW. <https://www.flussgebiete.nrw.de/die-hochwasserrisikomanagementplaene-fuer-nrw-5777>
- Pfister, A. (2016): Langjährige Entwicklung von Starkregen – Handlungsempfehlungen für die Zukunft. In: Tagungsband Essener Tagung 2016, Essen, 2016
- Robinson, A., Lehmann, J., Barriopedro, D., Rahmstorf, S., Coumou, D. (2021): Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate - npj Climate and Atmospheric Science | <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00202-w>
- Schüttrumpf, H., Birkmann, J., Brüll, C., Burghardt, L., Johann, G., Klopries, E.-M., Lehmkuhl, F., Schüttrumpf, A., Wolf, S. (2022): Die Flutkatastrophe 2021 im Ahrtal und ihre Folgen für den zukünftigen Hochwasserschutz. In: Wasser und Brunnen 14, Seiten/Artikel-Nr.:43-49
- Schumann, A. (2021): Instationarität in langjährigen Beobachtungsreihen der Abflusshöchstwerte In: HKC-Werkstattbericht Umgang mit hydrologischen Bemessungsgrößen in Zeiten des Klimawandels. <https://www.hkc-online.de/de/Projekte/HKC-Werkstattbericht>
- Umweltbundesamt (2022): Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/szenariennamen-stand_20220315.pdf

Wasserbezogene Nutzungskonflikte – Ergebnisse einer deutschlandweiten Medienrecherche

Thorben Uschan, Tim J. Diemel, Martina Flörke

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde eine Datenbasis auf Grundlage einer Medienrecherche geschaffen, die einen regionalisierten Überblick über berichtete wasserbezogene Nutzungskonflikte (WNK) in Deutschland enthält. WNK betreffen hierbei die Verfügbarkeit, Verteilung und Verwendung von Wasserressourcen. In der Ergebnisauswertung zeigte sich, dass die Häufigkeit der berichteten WNK besonders in den durch Trockenheit geprägten Jahren 2018 bis 2022 zugenommen hat. Darüber hinaus wurde deutlich, dass es eine räumlich sehr heterogene Verteilung der WNK, der zugrunde liegenden Konfliktarten und der involvierten Akteure gibt. Vorrangig wurde über WNK berichtet, die die Bevölkerung direkt betrafen bzw. die sichtbar waren (z. B. Niedrigwasser). WNK im industriellen Bereich sowie die Schifffahrt betreffend wurden von den Medienartikeln kaum erfasst. Die dargestellten Ergebnisse sind als Teilergebnisse zu verstehen und werden weiter ergänzt.

1. Einleitung

Konflikte, die die Verfügbarkeit, Verteilung und Verwendung von Wasserressourcen betreffen, können als wasserbezogene Nutzungskonflikte (WNK) bezeichnet werden. Bisher werden WNK vorwiegend aus Regionen mit semi-aridem bis aridem Klima berichtet, wie bspw. aus der Provinz Almeria (Spanien), in der eine auf Gewächshäusern basierende intensive Landwirtschaft zu einer Übernutzung des Grundwassers führt (Luis Caparrós-Martínez et al., 2020). Die Auswirkungen des Klimawandels durch vermehrt auftretende Hitzewellen und Dürren führen jedoch auch in Deutschland regional zu Wasserknappheit und somit zu WNK (BMU, 2020). Dies wird vor allem im außergewöhnlich warmen Jahr 2022 deutlich: Nach ersten Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes wurde im Jahr 2022 der Temperaturrekord des Jahres 2018 (10,5 °C im Jahresmittel) eingestellt. Bezogen auf die Referenzperiode 1961 – 1990 betrug das Niederschlagsdefizit 2022 etwa 15 %, wobei insbesondere der Sommer durch ein Defizit von 40 % auffiel (DWD, 2022).

Sinkende Flusspegel und Grundwasserstände gehen einher mit einer Verknappung der Wasserressource. Die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung sowie zusätzliche Wasserentnahmen, z. B. zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen und Kleingärten, verschärfen den Druck auf die verfügbaren Wasserressourcen zusätzlich. Auf diese Weise entstehen Nutzungskonflikte, die eine Herausforderung für die Gesellschaft darstellen.

Eine bundesweite Erfassung von WNK liegt derzeit nicht vor. Da davon auszugehen ist, dass WNK regional unterschiedlich ausgeprägt sind, ist es erforderlich, einen regionalisierten Überblick über das Auftreten von WNK zu schaffen, die jeweiligen Auslöser aufzuzeigen und die bisher angewendeten Maßnahmen darzustellen. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint eine öffentlich zugängliche Datenbasis daher sinnvoll. Das Ziel der vorliegenden Studie ist die Identifikation und erste Analyse von WNK in Deutschland.

2. Methodik

Zur Schaffung einer ersten Datenbasis wurden WNK systematisch in verschiedenen Medienformaten recherchiert. Hierzu wurden Zeitungen, Zeitschriften und Nachrichten genutzt. Die

Einbeziehung von überregionalen, besonders jedoch von regionalen Medienformaten, ermöglichte eine detaillierte räumliche Zuordnung der WNK. Auf Basis der räumlichen Informationen wurden die WNK in die NUTS¹-Gebietsklassifikation eingeordnet. Hierbei stellt die NUTS-3-Ebene (Kreise und kreisfreie Städte) die höchste räumliche Auflösung dar. War eine Zuordnung auf NUTS-3-Ebene nicht möglich, weil ein WNK bspw. überregional auftrat, wurde die nächsthöhere NUTS-2-Ebene (Regierungsbezirke) genutzt.

Für die Recherche wurden Suchmaschinen, Mediatheken und die online Datenbank wiso² verwendet. Die in thematisch passenden Medienartikeln enthaltenen Informationen wurden abstrahiert, kategorisiert und in einer Datenbank gespeichert. Durch die Kategorisierung, u. a. bezüglich der involvierten Akteure und der Konfliktart, konnten die heterogenen Informationen in den verschiedenen Medienformaten vergleichbar gemacht werden. Die Recherche wurde zum Stichtag 31.12.2022 beendet. Nachfolgend werden die ersten Ergebnisse der Studie dargestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurden im Rahmen der Recherche 331 WNK in Deutschland identifiziert. Berichte zu WNK reichen vom Jahr 2022 bis in die 1950er-Jahre zurück, wobei zu berücksichtigen ist, dass vor dem Jahr 2015 weniger als 5 WNK pro Jahr berichtet wurden. Eine Ausnahme bilden die Jahre 2003 und 2006, die insbesondere durch sommerliche Hitzewellen charakterisiert waren (jeweils 20 bzw. 15 berichtete WNK). Seit dem Jahr 2015 ist eine regelmäßige Berichterstattung über WNK vorhanden. Die Häufigkeit der berichteten WNK für den Zeitraum 2015 bis 2022 ist in Abbildung 1 dargestellt. Während die Häufigkeit in den Jahren 2015 bis 2017 im einstelligen Bereich liegt, ist ein deutlicher Anstieg in den Jahren 2018 bis 2022 zu erkennen. 2018 wurden deutschlandweit 38, 2022 bereits 117 WNK berichtet. Im Jahr 2021 wurden nur 18 WNK erfasst.

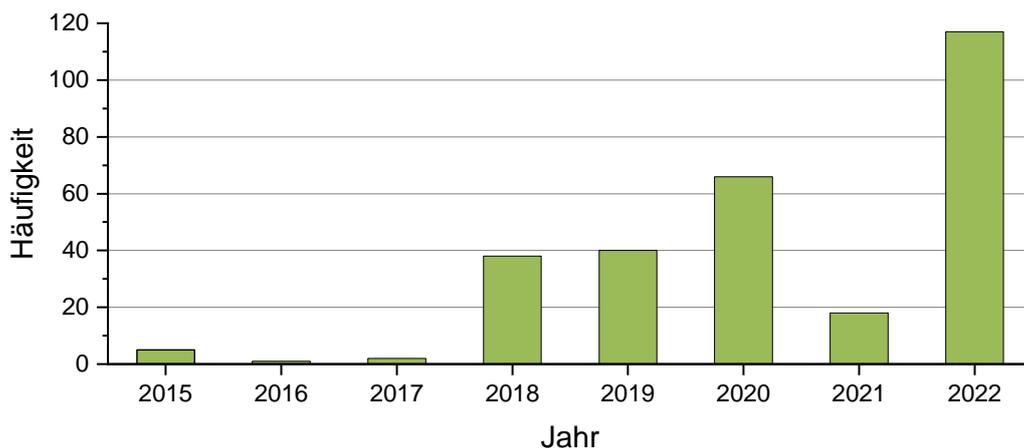


Abb. 1: Häufigkeit der in Medien berichteten WNK im Zeitraum von 2015 bis 2022.

¹ Nomenclature of Territorial Units for Statistics: Systematik zur Unterteilung der Europäischen Union in statistische Gebietseinheiten (Europäische Kommission, 2022).

² wiso ist eine Online-Datenbank für Wissenschaft und Forschung. Verfügbar unter: www.wiso-net.de.

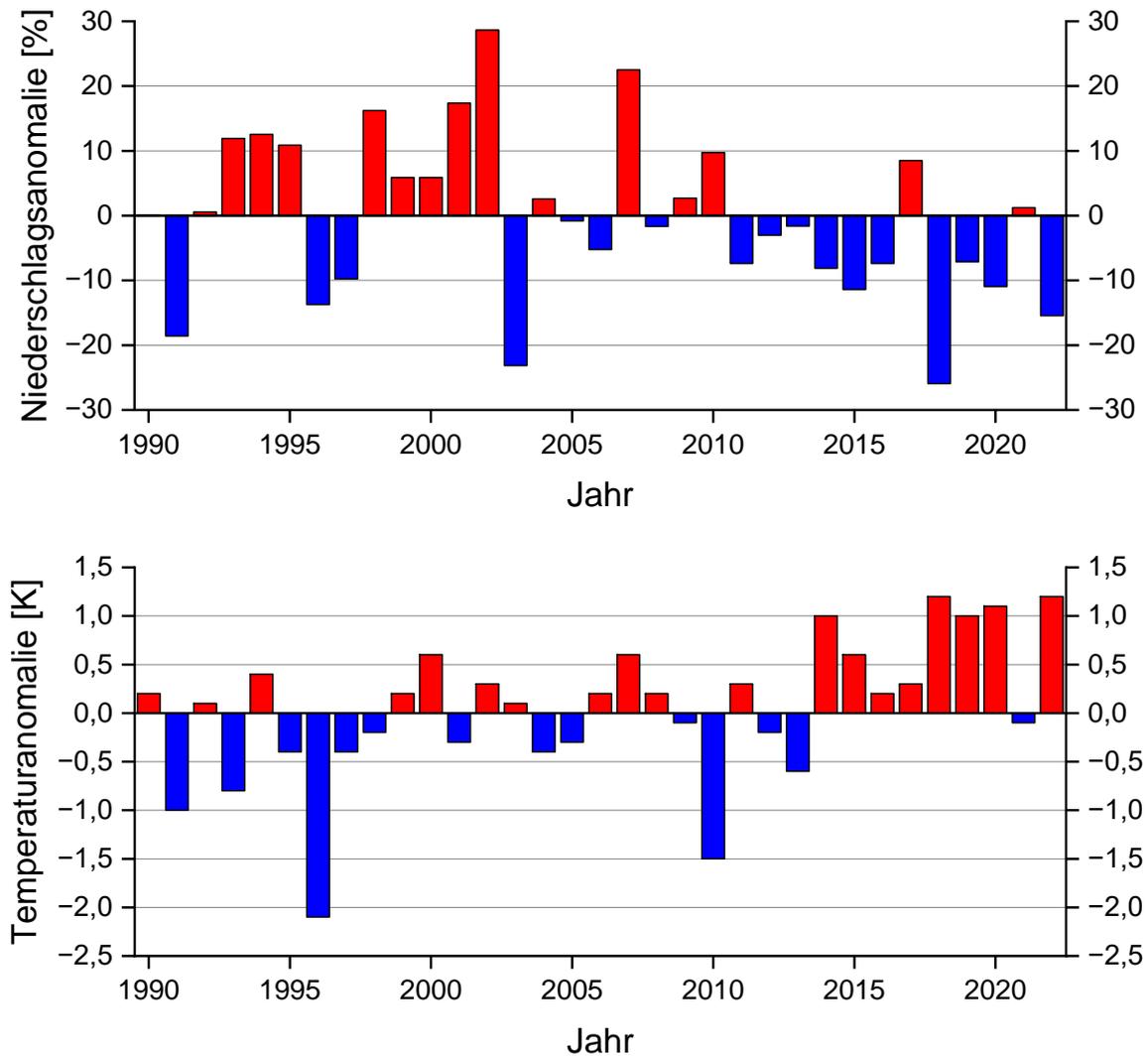


Abb. 2: Darstellung der Niederschlags- (oben) und Temperaturanomalien (unten) des Referenzzeitraums 1991 bis 2020 für den Zeitraum 1990 bis 2022. Datenquelle: DWD, 2023.

In Abbildung 2 sind Niederschlags- und Temperaturanomalien³ des Zeitraums 1990 bis 2022 dargestellt. Werden die Anomalien zur Einordnung der Häufigkeit herangezogen, ergeben sich Überschneidungen zwischen der Häufigkeit der berichteten WNK sowie der Amplitude der jeweiligen Anomalien. In dem dargestellten Zeitraum tritt die größte negative Niederschlags- und größte positive Temperaturanomalie im Jahr 2018 auf und geht mit einem sprunghaften Anstieg der berichteten WNK einher. Für die Jahre 2019 und 2020 zeichnet sich ein ähnliches Bild ab: große Amplituden der Anomalien bei hoher Anzahl berichteter WNK. Das Jahr 2021 war ein insgesamt durchschnittliches Wetterjahr mit ausreichend Niederschlag und einer negativen Temperaturanomalie (DWD, 2021), was sich in der Abnahme der Anzahl berichteter WNK äußert. Das Jahr 2022 weist eine weniger stark ausgeprägte Amplitude der Niederschlagsanomalie bei etwa gleicher Temperaturanomalie auf als das Jahr 2018, hat jedoch die größte Häufigkeit berichteter WNK. Somit ist davon auszugehen, dass spätestens seit 2022

³ Abweichung der Temperatur und der Niederschlagshöhe vom Mittelwert des Referenzzeitraums 1991 – 2020.

eine stärkere mediale Sensibilisierung für das Thema WNK vorhanden ist. Aus diesem Grund wird nachfolgend das Jahr 2022 genauer betrachtet.

3.1 Räumliche Verteilung

In Abbildung 3 ist die räumliche Verteilung der im Jahr 2022 berichteten WNK für NUTS-2- und NUTS-3-Regionen dargestellt. Bei der Betrachtung beider Abbildungsteile wird deutlich, dass WNK kein flächendeckendes Phänomen sind, sondern diese regional differenziert auftreten. Auf Ebene der NUTS-2-Regionen (linker Abbildungsteil) ist ein vermehrtes Auftreten berichteter WNK im Nordosten Deutschlands zu erkennen. Die am stärksten betroffenen Regierungsbezirke sind Brandenburg, Darmstadt, Sachsen-Anhalt und Thüringen mit jeweils zwischen 13 und 17 berichteten WNK. Die übrigen betroffenen NUTS-2-Regionen weisen weniger als 10 WNK auf. In 14 NUTS-2-Regionen traten hingegen keine WNK in Erscheinung.

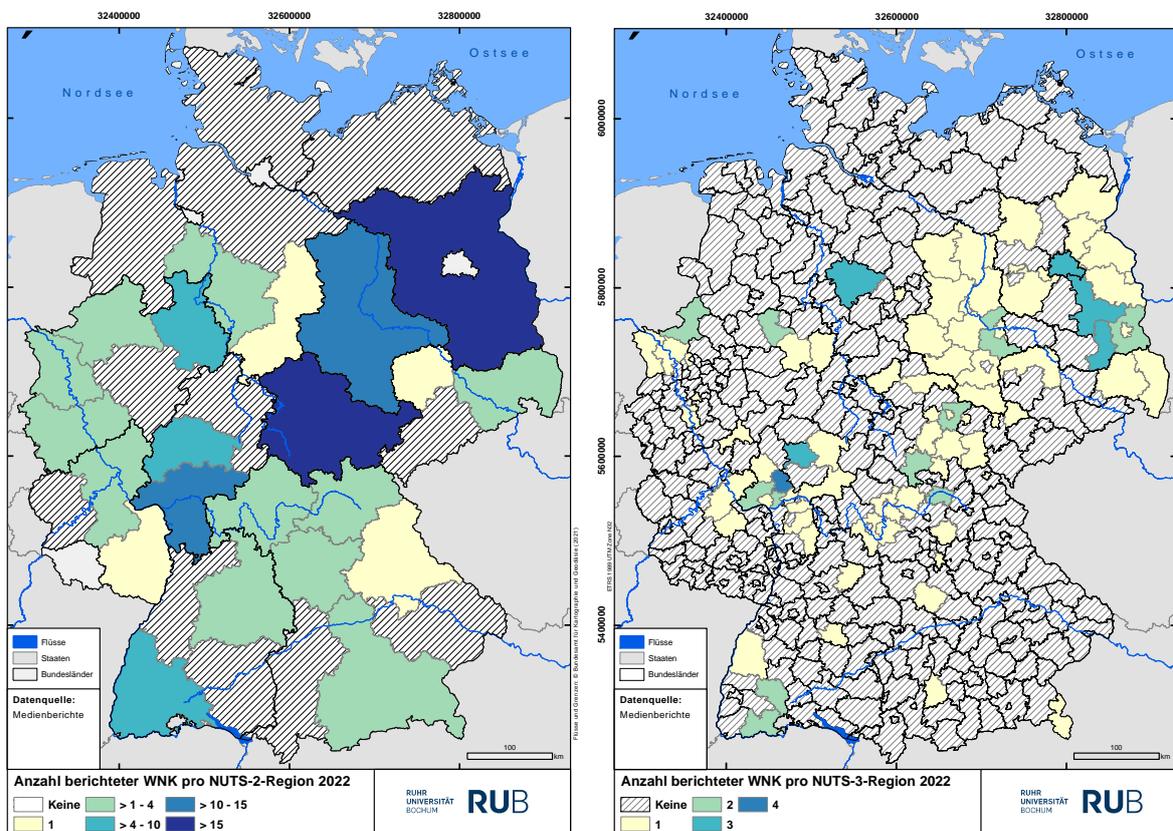


Abb. 3: Räumliche Verteilung der Häufigkeit der berichteten WNK im Jahr 2022 auf Ebene von NUTS-2- (links) und NUTS-3-Regionen (rechts).

Die Betrachtung von NUTS-3-Regionen (rechter Abbildungsteil) lässt eine stärkere räumliche Differenzierung zu und ermöglicht eine Aussage auf der Kreisebene. Hierdurch bedingt reduziert sich die Häufigkeit der berichteten WNK pro NUTS-3-Region. Dennoch lassen sich auch hier zusammenhängende NUTS-3-Regionen mit einem vermehrten Auftreten von WNK identifizieren, die im Nordosten, entlang der Grenze zu Polen, von der Oberlausitz bis in die Uckermark sowie im Spreewald lokalisiert sind. In Mitteldeutschland sind weitere zusammenhängende NUTS-3-Regionen von der Magdeburger Börde über die Leipziger Bucht bis in den

Thüringer Wald zu erkennen. Aber auch am Niederrhein und im Rhein-Main-Gebiet sind mehrere NUTS-3-Regionen von WNK betroffen. Im Hochtaunuskreis wurden mit 4 WNK die meisten WNK deutschlandweit berichtet.

Bei einem direkten Vergleich zwischen verschiedenen NUTS-2-Regionen in Abbildung 3 gilt es zu beachten, dass in den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Saarland, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen die Ausdehnungen der NUTS-2-Regionen den Ausdehnungen der Bundesländer entsprechen. Die Häufigkeit der WNK der NUTS-2-Regionen entspricht somit der des Bundeslandes.

3.2 Konfliktart und involvierte Akteure

Für eine erste Analyse der berichteten WNK wurden die Konflikte, die der Entstehung von WNK zugrunde liegen, zu Konfliktarten zusammengefasst. In Abbildung 4 sind die zusammengefassten Konfliktarten für das Jahr 2022 dargestellt.

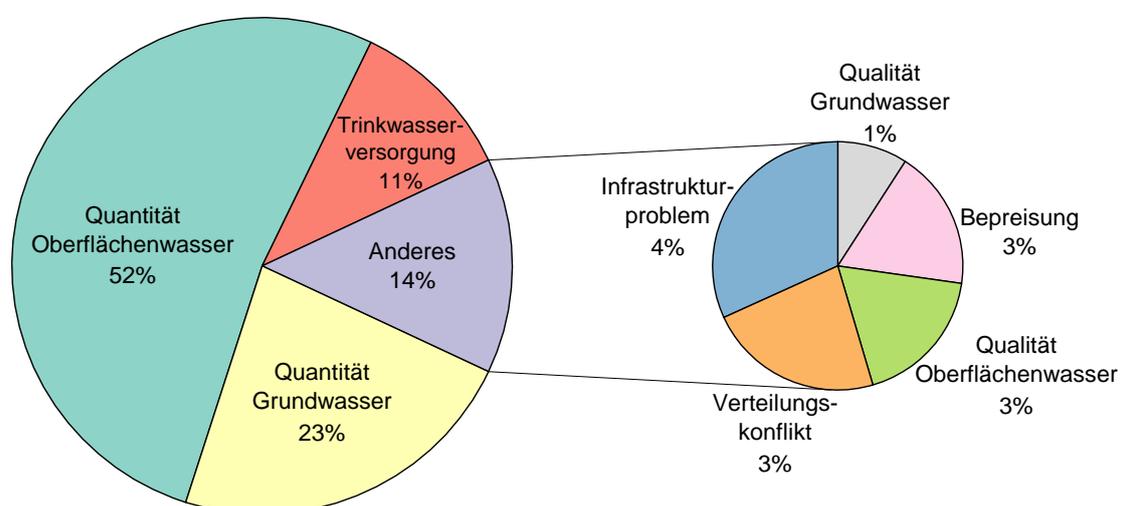


Abb. 4: Darstellung der im Jahr 2022 berichteten Konfliktarten, die den WNK zugrunde liegen (n = 157).

Es wird deutlich, dass 75 % der WNK auf eine unzureichende Quantität sowohl von Oberflächen- als auch von Grundwasser zurückzuführen sind. Beim Oberflächenwasser äußert sich dies bspw. in der Form von Niedrigwasser, beim Grundwasser in der Form von sinkenden Grundwasserspiegeln. Während die Konfliktart Quantität einen indirekten Einfluss auf die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung aufweist (Oberflächenwasser und Grundwasser dienen in Deutschland als primäre Wassergewinnungsquellen), weist die Konfliktart Trinkwasserversorgung (11 %) auf eine direkte Beeinträchtigung der Bereitstellung von Trinkwasser hin. Dies äußerte sich in Form einer eingeschränkten oder vollständig zusammengebrochenen Trinkwasserversorgung, die u. a. durch eine Trinkwasser-Ersatzversorgung mittels Tankwagen kompensiert werden musste.

Neben diesen Hauptkonfliktarten konnten fünf weitere klassifiziert werden: Infrastrukturprobleme – wie eine unzureichende Dimensionierung von Leitungen und Speichern – lagen 4 % der WNK zugrunde. Verteilungskonflikte, bei denen konkurrierende Akteure das Wasser nutzen möchten, machten etwa 3 % der Konfliktarten aus. Konflikte aufgrund von unzureichender

Qualität bzw. aufgrund zu hoher Wasserpreise sind bei den erfassten WNK kaum relevant (zusammen ca. 7 %).

So vielfältig die Konfliktarten sind, so vielfältig sind auch die in WNK involvierten Akteure, deren prozentualen Anteile in Abbildung 5 dargestellt sind. Privatverbraucher stellen die am häufigsten von WNK betroffenen Akteure dar (34 %), gefolgt von Ökosystemen (31 %). Dies sind auch die Akteure, bei denen Konflikte am deutlichsten wahrgenommen werden, bspw. bei einem Ausfall der Trinkwasserversorgung oder bei Niedrigwasser. Wasserversorger und Landwirtschaft sind jeweils zu etwa 15 % von WNK betroffen. Obwohl die Quantität des Oberflächenwassers die größte Konfliktart ausmacht, sind davon betroffene Akteure wie Schifffahrt (Transport) und Industrie (Kühlung) kaum bei den berichteten WNK involviert gewesen. Auch die Feuerwehr tritt im Zusammenhang mit WNK kaum in Erscheinung.

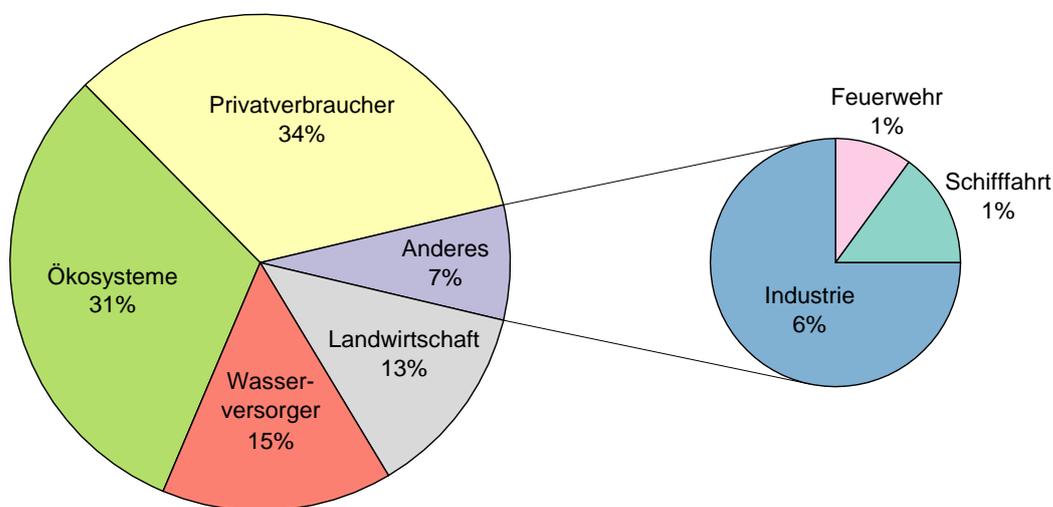


Abb. 5: Darstellung der im Jahr 2022 in WNK involvierten Akteure (n = 268; Werte gerundet).

4. Fazit und Ausblick

Im Rahmen einer Medienrecherche konnte gezeigt werden, dass WNK zunehmend auch aus Deutschland, und somit aus einem humiden Klima berichtet werden. Besonders deutlich wird dies in den durch Trockenheit geprägten Jahren 2018 bis 2022. Mit Hilfe der geschaffenen Datenbasis konnten erste Analysen durchgeführt und Aussagen zum Auftreten von WNK in Deutschland getätigt werden. Insgesamt wird deutlich, dass es eine räumlich sehr heterogene Verteilung von WNK, den zugrunde liegenden Konfliktarten sowie den involvierten Akteuren gibt.

Die Spannweite der Beeinträchtigungen, die durch WNK ausgelöst werden, ist groß. Beispielsweise kann diese von einer eingeschränkten (vgl. Badische Zeitung, 22. September 2015) bis hin zu einer vollständig zusammengebrochenen Trinkwasserversorgung (vgl. Deutsche Welle, 8. August 2020) reichen. Auch Verteilungskonflikte zwischen verschiedenen Akteuren sind möglich (vgl. RedaktionsNetzwerk Deutschland, 13. März 2020).

In den erfassten Medienartikeln wird vorrangig über solche WNK berichtet, die die Bevölkerung direkt betreffen bzw. die sichtbar sind. Dies gilt sowohl für die öffentliche Wasserversorgung, bspw. durch Entnahmeverbote oder durch eine Trinkwasser-Ersatzversorgung, als auch für

sichtbare Auswirkungen auf Ökosysteme, bspw. durch reduzierte Wasserführung von Fließgewässern oder deren Austrocknung. WNK im industriellen Bereich sowie die Schifffahrt betreffend werden von den Medienartikeln kaum erfasst. Aus den Ergebnissen lässt sich darüber hinaus ableiten, dass es im Laufe der durch Trockenheit geprägten letzten Jahre zu einem verstärkten medialen Interesse an WNK gekommen ist.

Die dargestellten Ergebnisse sind als Teilergebnisse zu verstehen und werden weiter ergänzt, um Aussagen zu durchgeführten Priorisierungen und angewendeten Maßnahmen zur Abmilderung und Reduzierung von WNK treffen zu können.

Literatur

- Badische Zeitung, 22. September 2015. Hochschwarzwald: Mancherorts wird das Wasser knapp [online]. Verfügbar unter: <https://www.badische-zeitung.de/hochschwarzwald-mancherorts-wird-das-wasser-knapp--111841125.html>
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit), Hg., 2020. Diskussionspapier zum Thema Nutzungskonflikte [online]. Verfügbar unter: https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/Diskussionspapier%20zum%20Thema%20Nutzungskonflikte_03032020.pdf
- Deutsche Welle, 8. August 2020. Corona und Hitze: Wassermangel in Lauenau [online]. Verfügbar unter: <https://p.dw.com/p/3gfh>
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2021. Deutschlandwetter im Jahr 2021. Ein durchschnittliches Wetterjahr - aber mit extremem Dauer- und Starkregen im Juli, 30. Dezember 2021. Offenbach.
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2022. Deutschlandwetter im Jahr 2022. Deutschland erlebt eines der zwei wärmsten Jahre und einen Sonnenscheinrekord, 30. Dezember 2022. Offenbach.
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2023. Zeitreihen und Trends [online]. Zeitreihen und Trends von Gebietsmitteln der Parameter Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und verschiedener Kenntage. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>
- Europäische Kommission, 2022. Statistical regions in the European Union and partner countries. NUTS and statistical regions 2021, 2022. 2022 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Manuals and guidelines / Eurostat. ISBN 978-92-76-55623-7. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/15193590/KS-GQ-22-010-EN-N.pdf>
- Luis Caparrós-Martínez, J., N. Rueda-Lópe, J. Milán-García und J. de Pablo Valenciano, 2020. Public policies for sustainability and water security: The case of Almeria (Spain) [online]. Global Ecology and Conservation, 23. ISSN 23519894. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.gecco.2020.e01037
- RedaktionsNetzwerk Deutschland, 13. März 2020. Wasserwerk will Feuerwehr bei Brandeinsatz das Wasser abstellen [online]. Verfügbar unter: <https://www.rnd.de/panorama/wasserwerk-will-feuerwehr-bei-brandeinsatz-das-wasser-abstellen-BPNLGBZCEBA-ZDLJF7TQH6LKJRA.html>

Ein digitales Tool für nachhaltige wasserwirtschaftliche Entscheidungen in einem anspruchsvollen Einzugsgebiet – Zayandeh Rud: von der Ideenentwicklung zur praktischen Anwendung

Ali A. Besalatpour, Shahrooz Mohajeri, Daniel Anatoliyevic Kaufman, Esmail Adib

Zusammenfassung

Der Fluss Zayandeh Rud fließt im gleichnamigen Einzugsgebiet im Zentraliran und bildet als Quelle für Trinkwasser, landwirtschaftliche Bewässerung und industrielle Versorgung die Lebensgrundlage für mehr als 5 Millionen Menschen. Der Klimawandel und die schlechte Bewirtschaftung der Wasserressourcen des Zayandeh Rud haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass dieser Fluss und seine Nebenarme sowie das Gavkhuni-Feuchtgebiet zeitweise austrocknen, der Wasserspiegel sinkt, das Land absinkt und das Ökosystem dieses Wassereinzugsgebiets schwer geschädigt wird. Im Rahmen des Projekts "Integriertes Wasserressourcenmanagement - IWRM Zayandeh Rud" (2010-jetzt), gefördert vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (BMBF), wurden verschiedene Konzepte, Modelle und ein zuverlässiges digitales Wassermanagement-Tool (WMT) entwickelt, das auf die bestehenden Herausforderungen des Wassermanagements im Einzugsgebiet des Zayandeh Rud reagieren kann. Die Basis für die Grundstruktur des WMT bilden vier verschiedene Softwares und dynamische Modelle: 1. WISKI-Software: Ein Datenmanagement-Tool, 2. SWAT-Modell: Ein hydrologisches Modell zur Simulation des natürlichen Abflusses infolge von Niederschlägen, sowie zur Berechnung von Wasser-Boden-Prozessen in den Oberflächenschichten, 3. FEFLOW: Ein Grundwassermodell zur Simulation der Interaktion von Oberflächen- und Grundwasser, sowie zur Simulation von Veränderungen des Grundwasserspiegels im Einzugsgebiet, 4. MikeHydroBasin (MhB): Ein Modell zur Steuerung des Bedarfs und der Wasserverteilung

Im ersten Schritt des WMT werden die erforderlichen Karten und Daten digital oder manuell in die WISKI-Software eingegeben und nach anschließender Analyse und entsprechenden Korrekturen den anderen Modellen zur Verfügung gestellt. Die Simulationsergebnisse aus dem hydrologischen Modell und dem Grundwassermodell werden in das Modell MhB eingegeben. Das Modell MhB erhält die erforderlichen Daten aus diesen Modellen und berücksichtigt alle menschlichen und verwaltungstechnischen Eingriffe. Dazu gehören z.B. Wassertransferprojekte, landwirtschaftliche, industrielle und Trinkwasserentnahmen und deren Versorgungsniveaus und Regeln für die Bewirtschaftung von Staudämmen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, verschiedene Verwaltungs- und Betriebsszenarien zu definieren. Die Hauptfrage, die das WMT beantworten kann, lautet: Wenn eine bestimmte Bewirtschaftungsentscheidung getroffen wurde, was wären dann die berechneten/erwarteten Auswirkungen.

Im späteren Verlauf wurde das WMT zu einem Entscheidungsunterstützungssystem (decision support system, DSS) erweitert. Dies soll den Entscheidungsprozess vereinfachen. Durch das anwenden können die Entscheidungen legitimiert werden, und dadurch bei den Beteiligten auf mehr Akzeptanz treffen. So können die erarbeiteten Lösungen allen Beteiligten einfach zur Verfügung gestellt werden.

In diesem Aufsatz werden die Struktur dieses digitalen Tools und seine Entwicklungs Herausforderungen vorgestellt, seine Stärken und Schwächen untersucht und die für verschiedene Szenarien erzielten Ergebnisse diskutiert, sowie deren Einsetzbarkeit weltweit begründet.

1. Einleitung

Integriertes Wasserressourcenmanagement (IWRM) ist ein international anerkannter Ansatz zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasserressourcen durch die Integration physikalischer, sozioökonomischer und ökologischer Aspekte. Das Hauptziel von IWRM ist es, die Entwicklung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen zu koordinieren, um das wirtschaftliche und soziale Wohlergehen gerecht zu maximieren, ohne die Nachhaltigkeit wichtiger Ökosysteme zu gefährden (Zarfl et al., 2015). In 18 Forschungsprojekten in Europa, dem Nahen Osten, Asien, Afrika und Lateinamerika wurden verschiedene Ansätze, Methoden und Technologien untersucht, um die Notwendigkeit und Machbarkeit von IWRM zu ermitteln und wie Managementkonzepte an lokale Gegebenheiten angepasst werden können. Das Bundesministerium

für Bildung und Forschung (BMBF) führt verschiedene Forschungsprojekte zur Entwicklung umfassender Planungsinstrumente zur Anpassung von Wassertechnologien an unterschiedliche klimatische, wirtschaftliche und soziale Bedingungen durch und unterstützt die Ziele der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) durch verschiedene Schulungsmaßnahmen. Der Iran, ein Land im Nahen Osten mit schwerwiegenden Wasserproblemen, war einer der Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten des BMBF, und die Implementierung von IWRM kann wertvolle Ergebnisse für die gesamte Region bringen. In diesem Zusammenhang wurde 2010 das Projekt "Integriertes Wasserressourcenmanagement - Zayandeh Rud" (IWRM Zayandeh Rud) mit finanzieller Unterstützung des BMBF in Zusammenarbeit mit iranischen Ministerien, Organisationen, Universitäten und einem auf den Wassersektor spezialisierten deutschen Konsortium definiert.

Das Hauptziel des IWRM-Projekts Zayandeh Rud ist es, Optionen für ein nachhaltiges Wasserressourcenmanagement im Iran und in der gesamten Region am Beispiel des Wassereinzugsgebiets Zayandeh Rud aufzuzeigen. Die Digitalisierung von Bewirtschaftungsentscheidungen zur Vorhersage ihrer Auswirkungen auf die Wasserressourcen in Einzugsgebieten und die Legalisierung von Entscheidungen sind ebenfalls Teil des Ziels. Dies wird durch die Entwicklung digitaler Tools für das Wasserressourcenmanagement erreicht. Im Rahmen des IWRM-Projekts Zayandeh Rud haben iranische und deutsche Partner ein IWRM-Konzept für das gesamte Einzugsgebiet entwickelt und umgesetzt. Dieses IWRM-Konzept sieht einen schrittweisen Prozess vor, in dem die wichtigsten nationalen, regionalen und lokalen Akteure Probleme im Einzugsgebiet identifizieren und Ideen zu deren Lösung sammeln. Diese Ideen werden in einem digitalen Wassermanagement-Tool (WMT) als Entscheidungsunterstützungssystem (decision support system, DSS) umgesetzt. Dadurch können wir zeigen, wie sich die vorgeschlagenen Maßnahmen auf die Wasserressourcen des Einzugsgebiets auswirken werden. Eine Übersicht über dieses Konzept ist in Abb. 1 dargestellt.

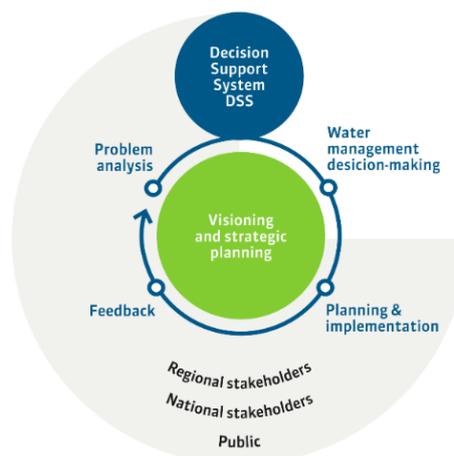


Abb. 1. Angepasstes IWRM-Konzept für das Zayandeh Rud-Einzugsgebiet.

In diesem Artikel werden wir uns kurz mit der Situation der Wasserressourcen im Iran und im Zayande Rud-Flusseinzugsgebiet befassen und dann die Entwicklung dieses digitalen Tools im Rahmen des Zayande Rud-IWRM-Projekts diskutieren. Weitere Informationen über das gesamte Projekt sind auf der Projektwebsite (<https://www.iwrm-zayandehrud.com/>) zu finden.

2. Wasserressourcen-Herausforderungen im Iran und im Zayandeh Rud-Einzugsgebiet

Der Iran ist eines der trockensten Länder der Welt mit ungefähr 89 Milliarden m³/a erneuerbaren Wasserressourcen pro Jahr, aber einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von nur 204 mm, weniger als einem Drittel des globalen Durchschnitts (Ebrahimnia und Jafari, 2017). Darüber hinaus ist das Land mit den Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert, wie mit steigenden Temperaturen und abnehmenden Niederschlägen, die das Problem der Wasserknappheit zusätzlich verschärfen (United Nations Environment Programme, 2016).

Ineffiziente Wassernutzung, veraltete Bewässerungssysteme und das Fehlen einer angemessenen Wassermanagementpolitik verschärfen das Problem der Wasserknappheit im Iran weiter. Die Landwirtschaft ist der Hauptnutzer von Wasser im Iran und macht etwa 90 % des Wasserverbrauchs des Landes aus. Die meisten Bewässerungssysteme des Iran sind jedoch ineffizient, da bis zu 60 % des Wassers durch Verdunstung und Leckagen verloren gehen.

Die iranische Regierung hat verschiedene Strategien und Maßnahmen zur Bewirtschaftung der Wasserressourcen des Landes umgesetzt. Trotz dieser Bemühungen steht die nachhaltige Bewirtschaftung der iranischen Wasserressourcen jedoch noch vor vielen Herausforderungen. Dazu gehören unzureichende Investitionen in die Instandhaltung und Modernisierung der Infrastruktur, unzureichendes öffentliches Bewusstsein und Beteiligung am Wasserressourcenmanagement, unzureichende Koordination und Integration zwischen verschiedenen wasserbezogenen Sektoren und Interessengruppen und vor allem das Fehlen eines umfassenden und anwendbaren integrierten Ansatzes für das Wasserressourcenmanagement im iranischen Flussbecken. Dies hat dazu geführt, dass viele Wassereinzugsgebiete im Iran mit ernsthaften Herausforderungen der Wasserknappheit konfrontiert sind. Eine dieser schwierigen Wassereinzugsgebiete ist das Einzugsgebiet des Flusses Zayandeh Rud im Zentraliran. Das Einzugsgebiet des Zayandeh Rud (Farsi für „Leben spendender Fluss“) ist eine der vielfältigsten Regionen im Iran: Vom schneebedeckten Zagros-Gebirge über weite Auen und Wüstengebiete bis hin zu den Gavkhuni-Feuchtgebieten ist es ein besonderer Lebensraum (Abb. 2). Der Fluss zieht Menschen seit Jahrhunderten an, und die gesamte Region hat eine einzigartige und vielfältige Ökologie. In den letzten 60 Jahren ist die Bevölkerung dem Einzugsgebiet von weniger als 1 Million auf über 4 Millionen angewachsen. Heute hängt der Lebensunterhalt von mehr als 1 Million Menschen von der Landwirtschaft ab, die Weizen und andere Grundnahrungsmittel produziert. Entlang des Flusses befinden sich bedeutende Stahl-, Öl- und Zementindustrien, die zusammen mit vielen kleinen Unternehmen über 300.000 Menschen beschäftigen. Zayandeh Rud ist der wichtigste Trinkwasserlieferant in der Region, zu der auch die Städte Isfahan und Yazd in Zentraliran gehören.

Das Einzugsgebiet ist geprägt durch verschiedene Wasserentnahmen, etwa für Trinkwasser, Industrie und Landwirtschaft, sowie Wassertransferprojekte in das und aus dem Einzugsgebiet. Da es zwei verschiedene Provinzen des Iran umfasst, wurde es von verschiedenen sozialen und politischen Herausforderungen begleitet. Stetiges Wachstum in der Region, gepaart mit dem Beginn und Missmanagement des Klimawandels, hat seinen Tribut gefordert und zu zunehmenden Herausforderungen beim Management der Wasserressourcen geführt. Da die Schere zwischen Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf immer weiter auseinanderklafft, verschärft sich der Wettbewerb zwischen den verschiedenen Wassernutzern um die knappe Ressource. Entscheidungen zur Wasserzuweisung und -verteilung durch verschiedene Nutzer im

Einzugsgebiet basieren hauptsächlich auf der Erfahrung von Experten und Einzugsgebietsmanagern, was zu viel Unzufriedenheit und sozialer Unruhe führt. All dies machte die Entwicklung eines nachhaltigen und integrierten Wassermanagementkonzepts zusammen mit einem digitalen Bewirtschaftungsinstrument für das Einzugsgebiet des Zayandeh Rud erforderlich.

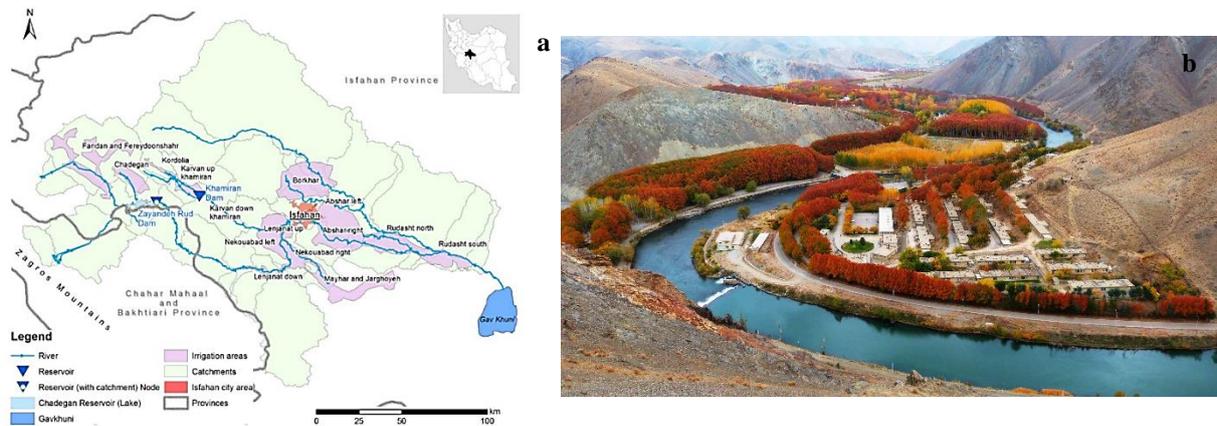


Abb. 2. Das Zayandeh Rud-Einzugsgebiet (a) und der Fluss Zayandeh Rud (b).

2. Einführung des Tools

2.1 Entwicklung der Idee

Als Grundlage für den IWRM-Prozess entwickelte das Projektteam zusammen mit den wichtigsten Interessengruppen ein digitales DSS auf der Grundlage des WMT für das Einzugsgebiet des Zayandeh Rud, dessen Ergebnisse von allen akzeptiert werden. Um das WMT zu entwerfen und zu entwickeln und seine zukünftige Nutzung sicherzustellen und die Meinungen und Vorschläge von Interessengruppen, Managern und Experten sorgfältig zu berücksichtigen, wurde zu Beginn der WMT-Erstellung und -Entwicklung unter den Interessengruppen ein interaktiver Workshop abgehalten. Dieser Workshop fand mit Beteiligung von Experten und Wissenschaftlern aus verschiedenen Organisationen und Hochschulen. Das Hauptziel dieses Workshops ist es, die Bedürfnisse und Anforderungen der Interessengruppen zu identifizieren, um sie an das WMT zurückzugeben, Erwartungen der Interessengruppen an das WMT zu sammeln und sie in seinem Entwicklungsprozess, Behörden und Entscheidungsträgern zu berücksichtigen und Entwicklung von WMT und Überprüfung von Vorschlägen und Beiträgen von Interessenvertretern und Experten zur Bewirtschaftung von Wasserressourcen des Zayandeh Rud Einzugsgebietes zu schaffen und zu entwickeln.

Die Idee, ein WMT zu erstellen, war von Anfang an interaktiv und basierte auf den Bedürfnissen der Interessengruppen, den Einzugsgebietsbedingungen und den Erwartungen aller Interessengruppen an das Tool. Dadurch wird das Tool nicht nur zur Grundlage für zukünftige Entscheidungen, sondern die Ergebnisse und Ergebnisse werden auch von allen Interessengruppen akzeptiert, da sie an seiner Gestaltung und Entwicklung beteiligt waren.

Daher lautet die wichtigste Frage, die WMT beantworten kann:

Wenn in der Vergangenheit bestimmt worden wäre, dass ein Faktor geändert werden sollte, dann hätte folgende berechnete Auswirkung in der Vergangenheit stattgefunden.

2.2 Komponenten des Tools

Um die wichtigsten Auswirkungen auf Wasserressourcen und deren Wechselwirkungen zu verdeutlichen, wurde in interaktiven Workshops vereinbart, vier separate Modelle zu entwickeln und in WMT zu integrieren: eine Datenmanagement-Software (WISKI), ein hydrologisches Modell (SWAT), ein Grundwassermodell (FEFLOW) und das Modell MIKEHydroBasin (MhB), mit dem Änderungen der Wasserverfügbarkeit in einem Einzugsgebiet aufgrund bestimmter Bewirtschaftungsentscheidungen dargestellt werden können. Die Berechnung der Wasserverfügbarkeit im MhB-Wassereinzugsgebietsmodell beginnt mit dem natürlichen Abfluss (SWAT), gefolgt von Wasserentnahme und Wassermanagement, wie Dammregulierung, Wasserumleitung und -umleitung, und Einleitung, z.B. aus Kläranlagen, einschließlich des Zayandeh Rud Flussauslaugungsverlust (FEFLOW). Jede dieser Software erhält die grundlegenden Eingabedaten, die sie benötigt, von der Datenmanagement-Software WISKI (siehe Abb. 3).

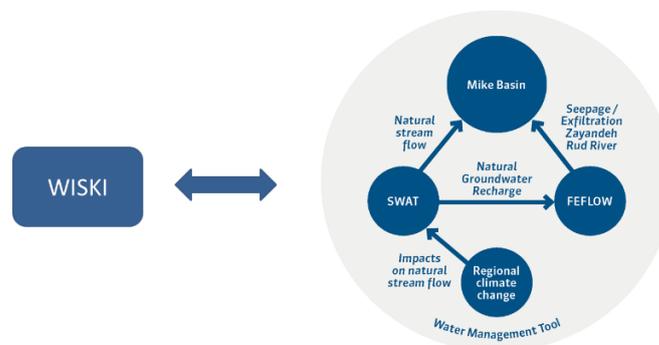


Abb. 3. Die Beziehung zwischen den verschiedenen Komponenten des WMT-Zayandeh Rud.

Die Modellkomponenten berücksichtigen die folgenden Prozesse:

- Natürlicher Abfluss (Abfluss infolge von Niederschlägen) sowie Niederschlag und potenzielle Verdunstung für Bewässerungsnetze (SWAT),
- Entnahmen für die Industrie (MhB),
- Entnahmen für den kommunalen Wasserbedarf (MhB),
- Entnahmen für den Wassertransfer vom Zayandeh Rud (MhB),
- Überleitung zum Zayandeh Rud (MhB),
- Entnahmen mit festem Bedarf für die Landwirtschaft wie Pumpen (MhB),
- Entnahmen mit dem von der FAO56 berechneten Bedarf für die Landwirtschaft in Bewässerungsgebieten (MhB),
- Ableitung durch Kläranlagen (MhB),
- Versickerung aus Zayandeh Rud (FEFLOW, MhB),
- Bewirtschaftung des Zayandeh Rud-Damms (MhB),
- Verteilung des Wassers auf die verschiedenen Wassernutzungen (MhB).

2.2.1 WISKI-Software: Datenmanagement-Tool

Die Implementierung und effektive Nutzung des WMT ist wichtig für die erfolgreiche Umsetzung des IWRM-Konzepts in Einzugsgebieten, was die Einrichtung eines zentralen Kerns für das Datenmanagement erfordert, um zuverlässige Statistiken und Informationen sowie kontinuierlich aktualisierte Daten zu sammeln. Diese Daten sollten gespeichert werden und in den

Modellen verfügbar sein, die in Wasserressourcen-Management-Tools verwendet werden. Während dieses Projekts wurde viel Zeit und Mühe darauf verwendet, verfügbare Informationen und Daten zu sammeln, sie zu überprüfen und die Daten zu erstellen, die für die Entwicklung des WMT - Zayandeh Rud erforderlich sind. Das Ergebnis sind umfassende und wertvolle Statistiken und verlässliche Informationen über das Einzugsgebiet, die von allen Interessensvertretern und Wassernutzern des Einzugsgebiets anerkannt werden. Die gesammelten Statistiken und Informationen werden mit Hilfe der Software WISKI (entwickelt von KISTERS International Company) gespeichert und verwaltet.

Die Entwicklung dieser Datenbank bietet einerseits die Möglichkeit, Daten zu sammeln und zu überwachen und die Qualität von Statistiken und Informationen zu verbessern, andererseits diese mit den in WMT- Zayandeh Rud verwendeten Modellen zu verknüpfen, das heißt automatisch zu aktualisieren. WISKI-Software ist eine Software zum Speichern und Verwalten von Daten und Informationen, die die Überprüfung und Analyse von Daten und deren Änderungen durch vordefinierte Algorithmen und statistische Methoden innerhalb der Software oder kundenspezifisch ermöglicht. Statistiken und Informationen können innerhalb dieser Software auch manuell oder online aktualisiert werden. Weitere Vorteile dieser Datenverwaltungssoftware sind die Erstellung von Berichten nach den Wünschen des Benutzers und die Extraktion von Daten in dem von ihm gewünschten Format sowie die Möglichkeit der automatischen Veröffentlichung von Daten im Internet oder Intranet.

2.2.2 SWAT-Modell: Hydrologisches Modell

Berechnungen zur Wasserverfügbarkeit im WMT-Zayandeh Rud basieren auf dem natürlichen Abfluss. Wir haben ein hydrologisches Modell für das Einzugsgebiet Zayandeh Rud unter Verwendung des SWAT-Modells in Kombination mit dem Programm Sequential Uncertainty Fitting (SUF12) kalibriert und validiert, um den natürlichen Abfluss in dem Einzugsgebiet abzuschätzen (Simulationszeitraum: 1995-2018). Verschiedene digitale Karten (z. B. DEM, Landnutzung und Boden) wurden erstellt, um die räumlichen Einheiten und Flusssysteme des Einzugsgebiets zu kartieren und zu beschreiben. Klimadaten, einschließlich täglicher Gesamtniederschläge (mm), maximale und minimale Temperatur (°C), Schneefall (mm.H₂O) und Managementdaten von Wasserumleitungsprojekten, Wasserverbrauchern, Quellen, Wasserentnahmefrühen usw. wurden aus diversen Quellen bezogen. Sensitivitäts-, Kalibrierungs-, Validierungs- und Unsicherheitsanalysen der Hydrologie wurden unter Verwendung monatlicher Flussabflussdaten durchgeführt. Neben der Simulation des natürlichen Abflusses wurde das kalibrierte und validierte SWAT-Modell für die raumzeitlichen Simulationen von Niederschlag, Verdunstung und Transpiration sowie Grundwasserneubildung verwendet, die von zwei anderen Modellen (FEFLOW und MhB) verwendet wurden. Das entwickelte SWAT-Modell selbst kann auch für andere Zwecke verwendet werden, wie z. B. die Schätzung von Wasserhaushaltsparametern, die Untersuchung der hydrologischen Bedingungen des Einzugsgebiets, die Untersuchung des Klimawandels und seiner Auswirkungen auf die hydrologischen Bedingungen des Einzugsgebiets usw. Abb. 4 zeigt das Gesamtschema der SWAT-Modellschnittstelle von Zayandeh Rud.

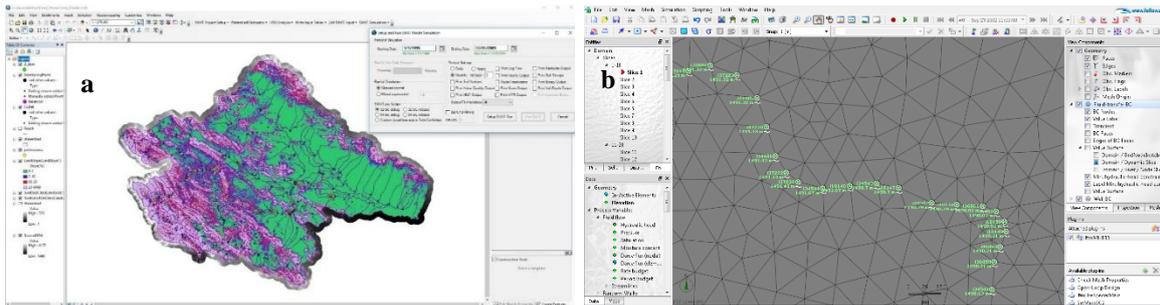


Abb. 4. Schnittstellen des SWAT-Modells (a) und des FEFLOW-Modells (b), die für das Zayandeh Rud-Einzugsgebiet entwickelt wurden.

2.2.3 FEFLOW: Grundwassermodell

In der Vergangenheit hat das wahllose Abpumpen von Grundwasser zu einem dramatischen Absinken des Zayandeh-Rud-Grundwasserspiegels und einer verstärkten Infiltration von Oberflächenwasser in die Grundwasserressourcen geführt. Das Grundwassermodell (FEFLOW) als Teil des WMT dient der Simulation der Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser. Die volumetrische Charakterisierung von Sickerwasser und Grundwasserpumpen in der Nähe des Flusses Zayandeh Rud war ebenfalls Teil der Ziele der Grundwassermodellierung.

Das FEFLOW-Modell wurde als transientes Modell mit konstanten Randbedingungen konstruiert und anschließend für den Zeitraum 1995-2009 hauptsächlich durch manuelle Variation der Parameter hydraulische Leitfähigkeit und Rückflusskoeffizient kalibriert. FEFLOW Zayandeh Rud erwog die Förderung von mehr als 1300 Quellen, fast 1000 Qanats und ungefähr 38.500 Brunnen. Geologische Daten, darunter über 500 Bohrprotokolle, Schichten, geologische Karten (Aquiferabdeckung) sowie topografische Karten und Daten aus Erkundungsbohrungen für Dichte und Permeabilität, wurden ebenfalls im gesamten Becken verwendet, um das FEFLOW-Modell zu erstellen.

Neben FEFLOW wurden weitere Modelle und Tools verwendet, um die Ergebnisse umzusetzen:

- Das Modell MIKE SHE, dies ist die künstliche Anreicherung durch Bewässerung in Kombination mit einer aktualisierten Berechnung der natürlichen Anreicherung simuliert, insbesondere auf nicht bewässerten Flächen.
- Das Modell MIKE 11 zur Berechnung der hydraulischen Bedingungen unterhalb des Zayandeh Rud-Damms für eine verbesserte Analyse der Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser.
- Das Plugin ifmmike11, welches das Flussmodell (MIKE 11) mit dem Grundwassermodell (FEFLOW) koppelt, um die Wechselwirkung im Zayandeh Rud zu quantifizieren.

Abbildung 4 zeigt das Schema der FEFLOW-Modellschnittstelle von Zayandeh Rud, gekoppelt mit MIKE 11.

FEFLOW verwendet auch die Grundwasserneubildung aus SWAT zusammen mit den gemessenen Grundwasserentnahmeraten, um den Wasseraustausch zwischen dem Oberflächenwasser im Zayandeh Rud Fluss und dem Grundwasser zu berechnen, welcher dann ein Eingabeparameter für das WMT ist.

2.2.4 MikeHydroBasin (MhB): Modell zur Steuerung des Bedarfs und der Wasserverteilung

MhB ist ein Entscheidungshilfemittel für die integrierte Analyse, Planung und Bewirtschaftung von Flusseinzugsgebieten (DHI 2012). Die Bilanzierung mit dem MhB Zayandeh Rud beginnt mit dem natürlichen Abfluss des hydrologischen Einzugsgebiets, das ist die Summe des Abflusses vom Oberbecken zum Einzugsgebiet. Das Verfahren führte zum natürlichen Abfluss des Flusses Zayandeh Rud an interessanten Stellen. Anschließend wurden Auswirkungen auf die Wasserentnahme und das Wassermanagement wie Dammregulierungen, Wassertransfers und -umleitungen sowie Einleitungen aus Kläranlagen, und die Versickerungsverlusten im Fluss Zayandeh Rud, betrachtet.

MhB ist in der Lage, den Abrechnungsprozess durch Scripting anzupassen und bietet die Möglichkeit, nahezu alle Eingabedaten zu ändern, um die Abrechnung an bestimmte Regeln oder Verhaltensweisen des Wasserhaushalts anzupassen, darunter das Zusammenspiel von Oberflächenwasser und Grundwasser. Aufgrund der Komplexität des Wassernutzungs- und Managementprozesses im Einzugsgebiet von Zayandeh Rud wurde diese Funktion stark genutzt. Dies gilt insbesondere für die Regelungen zum Staudammanagement und zur Wasserversorgung. Begründet wird MhB Zayandeh Rud mit Daten (lange Zeitreihen) zur Wassernutzung (kommunal und industriell) und Wasserabgabe sowie Dammanagement und Wasserversorgung. Da die Landwirtschaft den Großteil der Wasserressourcen der Region verbraucht, wurden auch für die Hauptarten detaillierte Wasserbedarfsberechnungen durchgeführt. Das obige Modell, das auf Daten und Regeln basiert, führte zu MhB Zayandeh Rud, wie in Abb. 5 gezeigt.

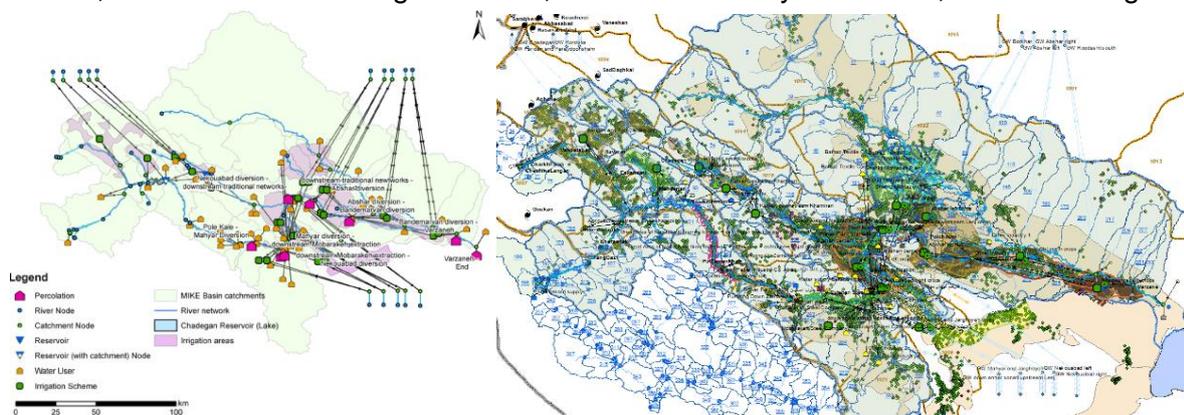


Abb. 5 Ein Überblick über das entworfene MikeHydroBasin-Modell für das Zayandeh-Rud-Einzugsgebiet unter Berücksichtigung verschiedener Wassernutzer und Wassertransferprojekte.

Das MhB Zayandeh Rud erhält verschiedene Eingabedaten aus der WISKI-Software sowie Eingaben aus Oberflächen- und Grundwassermodellen und berücksichtigt den Wasserbedarf der Nutzer und die hydrologischen Bedingungen des Einzugsgebiets. Damit bietet MhB Zayandeh Rud die Möglichkeit, die Wasserzuteilung für verschiedene Interessengruppen zu verwalten, indem ein umfassendes und integriertes Wasserzuteilungssystem für alle Interessengruppen erstellt und entsprechend priorisiert wird. Flussgebietsmanager werden in der Lage sein, verschiedene Szenarien und Strategien für das Wasserressourcenmanagement zu

definieren und das Ergebnis ihrer Entscheidungen zu bewerten, bevor sie umgesetzt und veröffentlicht werden.

Derzeit wird WMT-Zayandeh Rud praktisch von Wassereinzugsgebietsmanagern verwendet, um verschiedene Managementszenarien zu definieren. Teil 3 bietet ein praktisches Szenario, um zu demonstrieren, wie WMT funktioniert.

3. Implementierung des Tools in Form eines Fallbeispiels

Bisher wurden auf Wunsch von Entscheidungsträgern verschiedene Szenarien in Form von WMT umgesetzt. Hier nehmen wir das „Basic“ Szenario als Beispiel, um die Leistungsfähigkeit des WMT-Zayandeh Rud zu demonstrieren. Dabei wird von einer unveränderten Fortführung des Status quo des Beckens ausgegangen. Der natürliche Abfluss in einem Wassereinzugsgebiet wird mit einem SWAT-Modell simuliert. Anlagen im Bau sind in WMT enthalten, und andere Anlagen im Bau, die noch nicht in Produktion gegangen sind, sind nicht in WMT enthalten. Der Wasserbedarf der Industrie wird als konstant angesehen und die Verwendung von Abwasser wird für das Wachstum der Industrie in Betracht gezogen. Auch ein erhöhter zukünftiger Trinkbedarf wurde berücksichtigt. Bei der Landwirtschaft wurde die aktuelle Situation flussabwärts der Talsperre und die Zunahme der Anbaufläche flussaufwärts in den letzten Jahren berücksichtigt. Abschließend wurde eine Analyse der zukünftigen Situation des Beckens für einen mittelfristigen Zeitraum von 15 bis 20 Jahren durchgeführt.

Abb. 6 zeigt die Projektionen für die verschiedenen Komponenten des Beckens unter Basisfallbedingungen. Teil A zeigt die mittelfristigen Zukunftsprognosen von Zayandeh Rud Dam für trockene, normale und nasse Jahre. In Teil B wird der Verbrauch des Agrarsektors zwischen dem Staudamm Zayandeh Rud und dem Umleitungsdamm für den Transport von Wasser für die Industrie dargestellt. Diese Menge unterschied sich nicht signifikant zwischen trockenen, normalen und nassen Jahren. In den Teilen C und D wird der Wasserverbrauch für Trinkwasser- und Industriesektoren projiziert. Diese beiden Teile sind weniger von den Wetterbedingungen betroffen. Teil E zeigt die Verfügbarkeit von Oberflächen- und Grundwasserquellen für die Landwirtschaft im Lower Basin. 30, 213 und 425 Millionen m³ Wasser können jährlich zusätzlich zum Grundwasser aus Flüssen zugeführt werden. Dies bedeutet, dass in trockenen Jahren die landwirtschaftlichen Aktivitäten im Unterlauf des Beckens stark beeinträchtigt werden. Der Druck auf den Grundwassersektor wird ebenfalls hoch bleiben, da die Ernte voraussichtlich negative Auswirkungen auf die Grundwasserleiter haben wird. Teil F zeigt, dass die Anforderungen der Feuchtgebietsumgebung in unterschiedlichen Trockenjahren, normalen Jahren und Regenzeiten nicht erfüllt werden können und ihre zersetzenden Auswirkungen wahrscheinlich andauern werden.

4. Schlussfolgerung

Wie bereits erwähnt, ist das Einzugsgebiet des Flusses Zayandeh Rud ein äußerst komplexes Bewirtschaftungsgebiet mit zahlreichen Herausforderungen und sozialen Konflikten aufgrund von Wasserknappheit und ungleichmäßiger Verteilung innerhalb des Einzugsgebiets. Die meisten der im Einzugsgebiet getroffenen Managemententscheidungen haben heftige Reaktionen und heftigen Wettbewerb unter den Wassernutzern hervorgerufen, da viele Entscheidungen vorläufig sind und ausschließlich auf dem Wissen und der Erfahrung von Experten und Managern beruhen. Die Einführung von des WMT erleichtert das ordnungsgemäße Management von Wassereinzugsgebieten erheblich, da Entscheidungsträger die Auswirkungen und Konsequenzen ihrer Entscheidungen sehen und vorhersagen können. Das WMT kann auch dazu beitragen, die Wasserverteilung innerhalb des Einzugsgebiets zu optimieren, insbesondere in der Landwirtschaft, die das meiste Wasser verbraucht. Durch die Ermittlung der Auswirkungen von Wasserzuteilungsstrategien auf verschiedene Wassernutzer wie Landwirtschaft, Industrie und Trinkwasser kann WMT Manager bei der Wasserzuteilung erheblich unterstützen und ein umfassendes Wasserzuteilungssystem für alle Interessengruppen erstellen und gleichzeitig die Prioritäten festlegen. Darüber hinaus kann WMT den Entscheidungsfindungsprozess für die zukünftige Planung erleichtern und beschleunigen, insbesondere unter Berücksichtigung von Änderungen der Wasserressourcen im Laufe der Zeit aufgrund verschiedener menschlicher und klimatischer Faktoren. Schließlich kann das WMT dazu beitragen, mögliche Konflikte zwischen Interessengruppen über Wasserknappheit in der Region zu reduzieren und Wasserressourcen und -verbrauch in Einzugsgebieten auszugleichen.

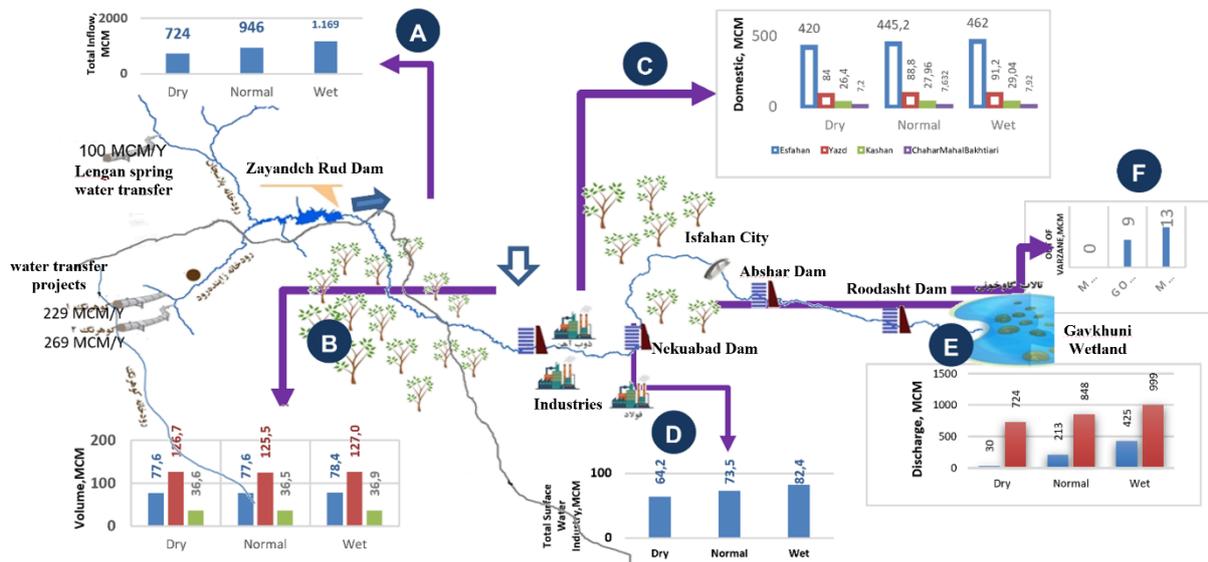


Abb. 6. Schema des Zayandeh Rud Einzugsgebiets und der wichtigen Komponenten der Wasserressourcen und -nutzungen mit der von WMT bereitgestellten mittelfristigen Zukunftsprognose unter Berücksichtigung des Basisszenarios (Fortsetzung der aktuellen Situation).

Literatur

- DHI., 2012. MIKE Basin. A modelling system for river basin management and planning. Model Dokumentation. MIKE by DHI 2012.
- Ebrahimnia M., Jafari, B., 2017. Water resources in Iran and the reasons for stablishing river basin organizations: review of the first experience for Zayandeh Rud. In. Mohajeri S., Horlemann L., (eds) Reviving the drying giant – integrated water resources management in the Zayandeh Rud catchment, Iran. Springer Natur, Cham.
- United Nations Environment Programme., 2016. Iran: Environment and Climate Change Outlook. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/18032/Iran_ECCO.pdf
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K., 2015. A global boom in hydro-power dam construction. Aquatic Sciences, 77(1), 161-170.

Kompensation der unterirdischen Verdichtung im urbanen Bereich durch Grundwasserüberleitungsanlagen und deren Dimensionierung mittels Grundwassermodellierung

Philipp Huttner, Patrick Keilholz, Katja Eulitz, Ferdinand Flechtner

Zusammenfassung

Bei der Planung von Gebäuden in Bereichen mit flurnahen Grundwasserständen kann eine schädliche grundwasserseitige Auswirkung die Folge sein. Die resultierenden höheren oder niedrigeren Grundwasserstände können bei benachbarter Bebauung zu Vernässung oder Setzungsschäden führen. Eine wartungsarme Ausgleichsmaßnahme stellen Grundwasserüberleitungsanlagen in Form von Grundwasserdüchern dar. Diese lassen sich beliebig an die vor Ort geltenden Bedingungen anpassen und mit Hilfe von numerischen Grundwassermodellen effektiv und kostengünstig dimensionieren. Die aktuelle Computertechnik mit komplexen 3D-Ansichten und immer besser werdenden Rechenansätzen ermöglichen hier sehr zuverlässige Aussagen im Zentimeterbereich, welche bereits durch zahlreiche Projekte verifiziert wurden und immer mehr Akzeptanz bei den Behörden finden. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, den Flächenverbrauch zu reduzieren und die Auswirkungen der urbanen Verdichtung auszugleichen.

1. Hintergrund und Problematik

1.1 Urbane Verdichtung und hohe Grundwasserstände

Die Flächen für Neuerschließungen und neue Bebauungsgebiete werden vor allem im städtischen und stadtnahen Gebieten immer weniger. Grundstücke mit grundsätzlich ungünstigen Rahmenbedingungen, wie z.B. flurnahem Grundwasserspiegel, werden dadurch heutzutage immer interessanter für Städteplaner. Ebenso steigt das Interesse und die Tendenz, alte Gebäude abzureißen und mit größerer Gründungstiefe für Tiefgaragen im Stadtkern zu planen. Diese Verdichtung im städtischen Bereich hat nicht nur auf die Grundwasserneubildung einen nachteiligen Effekt, sondern beeinflusst auch die natürliche Grundwasserströmung.

Der neue Baukörper stellt dabei oft ein unüberwindbares Hindernis für den natürlichen Grundwasserstrom dar, sodass es zu dauerhaftem Aufstau und zur Absenkung führen kann.

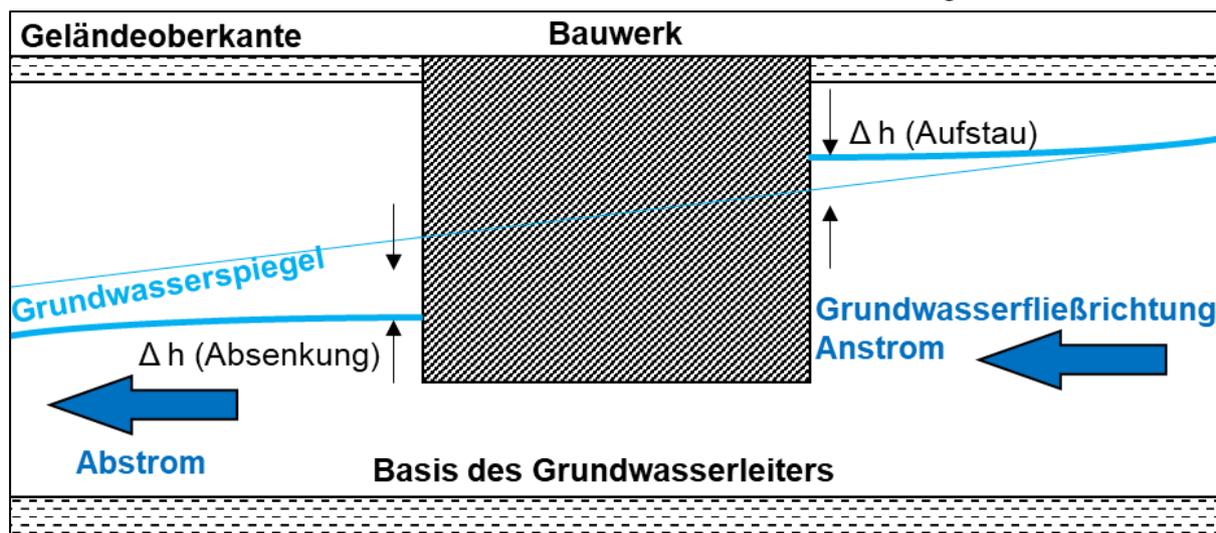


Abb. 1: Skizzenhafte Darstellung der Grundwasserverhältnisse mit und ohne Baukörper.

1.2 Lösungsansätze in der Vergangenheit

Zur Reduktion der grundwasserseitigen Auswirkungen wurden oftmals sogenannte Flächen-drainagen in Form von sehr durchlässigem Kies als Hinterfüllung um das Bauwerk mit eingebracht. Durch die höheren Durchlässigkeiten wurde die reduzierte Transportfähigkeit des Grundwasserleiters auf Grund verringerter Fließquerschnitte wieder ausgeglichen. Dieser Ansatz eignet sich vorrangig bei geringeren Auswirkungen durch den Baukörper.

Eine größere Wirkung erzeugt man durch lokale Grundwasserentnahme durch Brunnen oberstromig und eine unterstromige Wiederversickerung mit Hilfe von Schluckbrunnen. Diese Herangehensweise ist typisch für die temporäre Bauwasserhaltung während der Bauphase, da der Aufwand für die Einrichtung verhältnismäßig gering ist und die Entnahme relativ genau gesteuert werden kann. Dem entgegen stehen die dauerhaften Kosten für den Betrieb der Anlage, sodass sich diese Lösung in den seltensten Fällen als dauerhafte Maßnahme im Hinblick auf die Kosten verantworten lässt.

2. Grundwasserüberleitung mittels Horizontalfilterbrunnen

2.1 Prinzip

Eine in der Praxis bereits vielfach angewandte und oft bewährte Lösung stellt dabei eine Grundwasserdüker-Überleitung dar (auch Grundwasserkommunikationsanlagen genannt). Dabei wird mit horizontalen, geschlitzten Filterrohren (ähnlich der Bauweise von horizontalen Trinkwasserbrunnen) das Grundwasser auf der Entnahmeseite gefasst, mittels Vollrohren über Transportleitungen unter oder um den Baukörper herumgeführt und auf der Abstromseite über abermals geschlitzte Filterrohre an den Grundwasserleiter wieder abgegeben, sodass der natürliche Grundwassergradient nahezu wieder hergestellt wird (gängige Anforderung der Behörden: dauerhafter Aufstau/Absenkung $< \pm 10$ cm bzw. keine negative Beeinflussung der Nachbarbebauung).

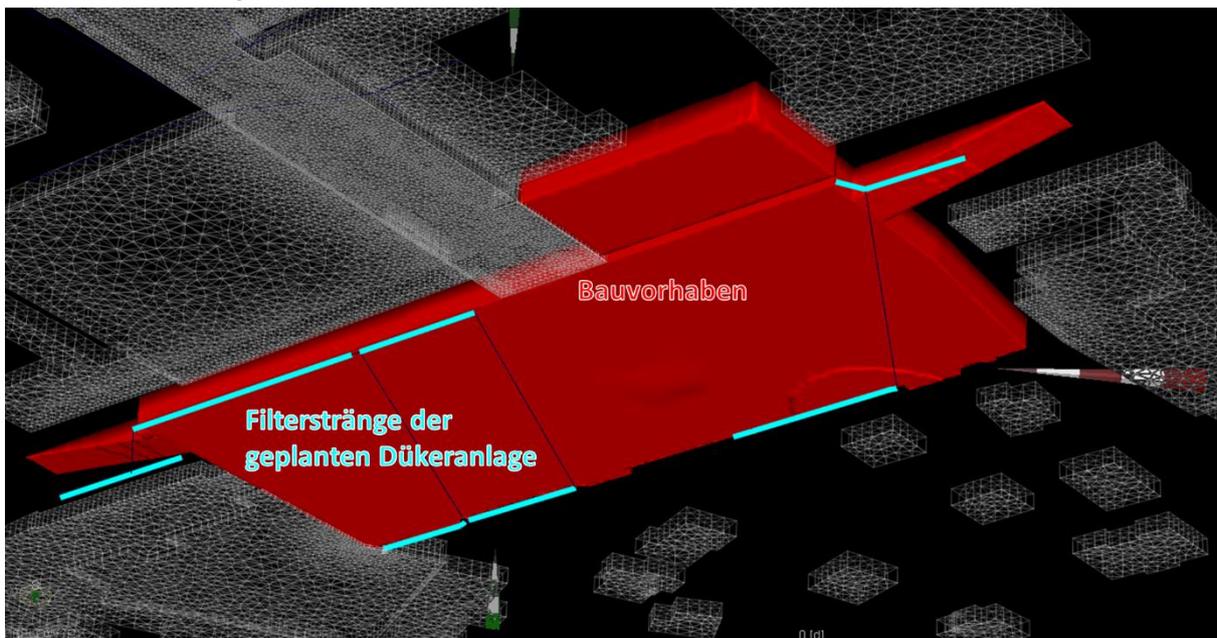


Abb. 2: 3D-Ansicht eines geplanten Bauwerks und zugehöriger Dükeranlage (Ansicht von unten in FEFLOW ©).

2.2 Übersicht an Ausführungsvarianten

Eine vollständige Grundwasserüberleitungsanlage besteht aus geschlitzten Filterrohren, welche als Entnahmestrange fungieren. Anschließend fließt das Grundwasser lediglich durch den hydrostatischen Druck getrieben über Vollrohre auf die abstromige Seite. Dort wird es abermals über geschlitzte Filterstränge, sogenannte Versickerungsstränge, wieder an den Grundwasserleiter abgegeben. Die Anordnung der Entnahme- und Versickerungsstränge ist dabei je nach baulichen Zwangspunkten beliebig planbar. Gängige Ausführungsvarianten sind oft Sterndüker (a), T-Düker (b) oder Z-Düker (c). Bereits in der Praxis umgesetzt wurden oft Sterndüker, welche aus geohydraulischer Sicht eine geringe Wirkung im Vergleich zu den hohen Herstellungskosten besitzen. Da die Grundwasserüberleitung auf Grund des sich einstellenden Grundwassergradienten erfolgt, sind angewinkelte Z-Düker (d) die kostengünstigste und effektivste Konstellation, um ein möglichst hohes Grundwassergefälle bei geringen Rohreiverlusten zu nutzen.

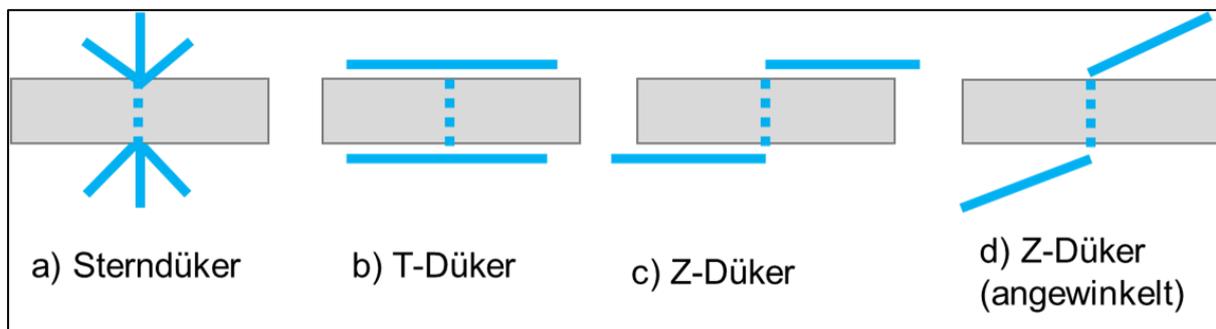


Abb. 3: Skizzenhafte Übersicht gängiger Ausführungsvarianten von Grundwasserdüker.

3. Modelltechnische Bemessung

Bisher wurden Planungen der Grundwasserdüker oftmals analytisch oder mit Hilfe einfacher Box-Grundwassermodelle berechnet. Aufgrund dieses einfachen Ansatzes werden Düker teilweise überdimensioniert oder völlig unpassend angeordnet. Durch den Aufbau deutlich komplexerer 3D-Grundwassermodelle mit der Software FEFLOW, in denen die Geometrie und Rohrhydraulik des Dükers durch innovative Ansätze besser abgebildet werden, können verschiedenste Konstellationen schnell und effizient modelliert werden. Die Innovation in diesem Ansatz ist die kombinierte Betrachtung von Grundwasserströmung und Rohrhydraulik in einem iterativen Vorgang. Oft wird dadurch erst eine realistische Auslegung des Systems ermöglicht.

3.1 Simulation des Grundwasseraufstaus

Den technischen Nachweis der Durchführbarkeit und der Funktionsweise kann man ausschließlich mit einer modellgestützten Grundwassermodellierung belastbar erbringen. Dabei wird auf Grundlage der Planungsunterlagen und meist öffentlich verfügbaren Daten ein 3-D Grundwassermodell aufgebaut, welches dabei die Grundwasserdüker in ihrer Geometrie bereits mit abbildet. Das Modell wird anschließend für verschiedene hydrologische Zustände (z.B. Mittel-/Niedrig-/Hochwasser) stationär kalibriert, bis die vorherrschende Grundwasserströmung gut abgebildet wird.

3.2 Überprüfung der Rohrhydraulik

Die Fließprozesse innerhalb des Dükersystems unterliegen den Gesetzen der Rohrhydraulik. Entsprechend entstehen Rohrreibungsverluste innerhalb der Leitungen, welche bisher noch nicht exakt in Grundwassermodellen mitberücksichtigt werden können. Um die real geringere ausfallende Transportkapazität der Leitungen im Grundwassermodell mit zu berücksichtigen, erfolgt außerhalb des Grundwassermodells eine manuelle Berechnung der theoretisch entstehenden Reibungsverluste. Die im Grundwassermodell berechnete Differenz zwischen Grundwasserdruckhöhe am Einlauf und am Auslauf muss dabei für die finale Lösung die Summe der Rohrreibungsverluste übersteigen, um die Realität korrekt abzubilden.

3.3 Iterative Anpassung der Filterstränge mittels dynamischer Neuvernetzung

Sobald das Grundwassermodell als prognosefähiges Planungswerkzeug eingestuft werden kann, werden unterschiedliche Düker-Anordnungen iterativ zwischen numerischem Grundwassermodell und analytischen Ansätzen der Rohrreibungsverluste simuliert, bis der zulässige Aufstau unterschritten wird. Dabei ist oft eine Überarbeitung des Berechnungsnetzes notwendig, um die lokalen Einflüsse des Dükersystems belastbar abbilden zu können.

3.4 Optimierung der Auswirkungen und Reduktion der Baukosten

Die Möglichkeiten einer Dükeranlage umfassen auf Grund der komplexen Zusammenhänge vielfältige Konstellationen. Die Reduzierung des bauseitig bedingten Grundwasseraufstaus erfordert meist größere Rohrdurchmesser, sowie längere Filterstrecken, um die Rohrreibungsverluste und somit die verringerte Durchflussleistung möglichst auszugleichen. Aber durch eine wohlüberlegte Untersuchung von unterschiedlichen Ausführungsvarianten können gleichermaßen Grundwasseraufstau reduziert und Baukosten optimiert werden.

4. Praxisbeispiele

Dieser bisher noch nicht sehr weit verbreitete Ansatz wurde unter anderem am Flughafen München, für diverse U-Bahn-Stationen in München, in Geretsried und am City Tunnel in Leipzig durch Glitsch & Spang (2009) erfolgreich angewendet.

4.1 Flughafen München

Der Flughafen München wurde im Erdinger Moos im Münchner Norden errichtet und viele Bauwerke reichen deutlich unter den mittleren Grundwasserstand. Das ganze Flughafengelände verfügt bereits über ein weitverzweigtes und komplexes Grundwasserüberleitungssystem. Dieses wird im Rahmen von betrieblichen Erweiterungen ergänzt und angepasst. Sowohl komplexe hydrogeologische Schichtenabfolgen als auch beliebige Bauausführungen lassen sich inzwischen in Grundwassermodellen wie FEFLOW vollständig abbilden.

Im Rahmen der Erweiterung des Terminal 1 (T1E) erforderte der Neubau ebenfalls die Planung und Bemessung von neuen Grundwasserüberleitungsanlagen. Hierfür wurden insgesamt 4 Grundwasserdüker geplant und mit Hilfe des Grundwassermodells in FEFLOW dimensioniert, um das im Anstrom anfallende Grundwasser unter der Bodenplatte zum bestehenden Dükersystem überzuleiten. Eine dreidimensionale Ansicht des geplanten Gebäudes sowie der Dükerstränge ist in Abbildung 4 zu sehen.



Abb. 4: 3D-Ansicht des geplanten Gebäudes (schwarze Linien) und geplanter Dükerstränge (blaue Linien).

Neben den resultierenden Grundwasserständen werden ebenfalls die Durchflussraten des Rohrleitungssystems simuliert. Inzwischen wurde durch die Flughafenverwaltung bereits ein Durchflussmessgerät installiert, welches die im Modell simulierten Wassermengen bis auf eine Restunsicherheit von wenigen Litern pro Sekunde bestätigen konnte.

Die modelltechnischen Optimierungen in diesem und weiteren Projekten umfassten dabei nicht nur die Reduzierung der grundwasserseitigen Auswirkungen, es erfolgte auch eine Ermittlung der kostengünstigsten Ausführungsvarianten mit zufriedenstellenden grundwasserseitigen Auswirkungen. Dabei konnten die Material- und Baukosten für den Flughafen München bereits im 6-stelligen Bereich verringert werden.

4.2 Stadt Geretsried

Die urbane Verdichtung schreitet nicht nur in größeren Ballungszentren voran, sondern birgt auch Vorteile für kleinere Städte. Der Ortsteil Gartenberg von Geretsried im Süden von München hat bereits vor mehreren Jahren mit der Planung der „Neuen Mitte“ als modernen Stadtkern begonnen. Da hier bereits in der Vergangenheit Probleme mit vernässten Kellern bei starken Niederschlägen und folglich hohen Grundwasserständen bekannt waren, war ein kontinuierliches Grundwassermonitoring und ein vorausschauendes Grundwassermanagement zwingend erforderlich. Im Auftrag der Stadt Geretsried und der ausführenden Bauherren hat die DHI WASY mehrere Grundwassermessstellen mit teilweise öffentlich verfügbarer Datenfernübertragung eingerichtet. Die Errichtung des neuen Zentrums erfolgte in mehreren Schritten von größeren Baumaßnahmen, welche nach und nach umgesetzt wurden. Hierbei führte jede Maßnahme zu einer unterirdischen Verdichtung, sodass dem natürlichen Grundwasserstrom immer weniger Fließquerschnitt zur Verfügung stand. Im Hinblick auf zukünftig anstehende Baumaßnahmen wurde ein flexibles Grundwasserüberleitungssystem geplant und im Grundwassermodell FEFLOW von Huttner & Keilholz (2020) dimensioniert, um den natürlichen Grundwasserstrom weiterhin durch die Stadt zu führen. In der folgenden Abbildung 5 ist eine der zuletzt geplanten und bereits gebauten neuen Tiefgaragen in gold zu sehen (Blick

von unten). Das Berechnungsnetz in FEFLOW ist dabei in der Lage auch kleinste Geometrien, wie einzelne Spundwandbohlen, durchlässige Verfüllungen mit Schichtdicken von wenigen Zentimetern sowie deren Auswirkungen auf die resultierenden Grundwasserstände zuverlässig zu simulieren.

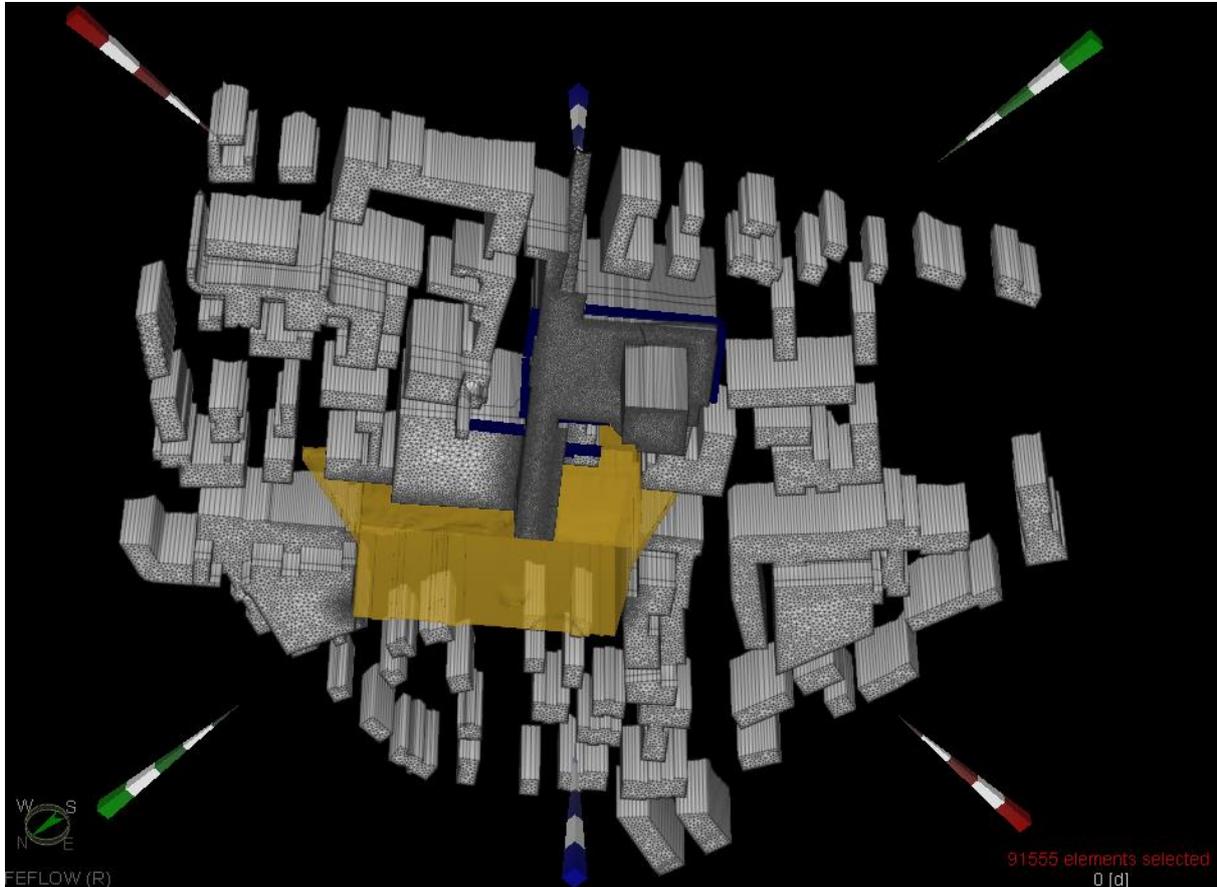


Abb. 5: 3D-Ansicht der Bestandsgebäude und neu geplante Tiefgarage (gold).

Der Einsatz der komplexen Grundwassermodellierung zur Kompensation der baubedingten Auswirkungen hat inzwischen eine große Akzeptanz bei Bauherren und Genehmigungsbehörden erreicht. Neben der Auslegung der Grundwasserdükeranlage selbst, wird oft zusätzlich das streckenweise Ziehen von eingebrachten Spundwandbohlen oder das teilweise Überbohren von Bohrpfählen mit betrachtet, um die Auswirkungen bis auf die letzten Zentimeter zu reduzieren. Die Betrachtung dieser kleinteiligen Maßnahmen war bisher nicht belastbar möglich und bietet zukünftig somit weitreichende Möglichkeiten. In der nachfolgenden Abbildung ist die finale Planung im 3D-Grundwassermodell zu sehen. Das geplante Gebäude (rot) ist streckenweise von betonierten Bohrpfahlwänden umgeben (gold). Diese wurden bereichsweise bis zu einer bestimmten Tiefe überbohrt (grün), um den Grundwasserfluss zu den Entnahmestängen und somit zur Grundwasserüberleitung zu ermöglichen (türkis).

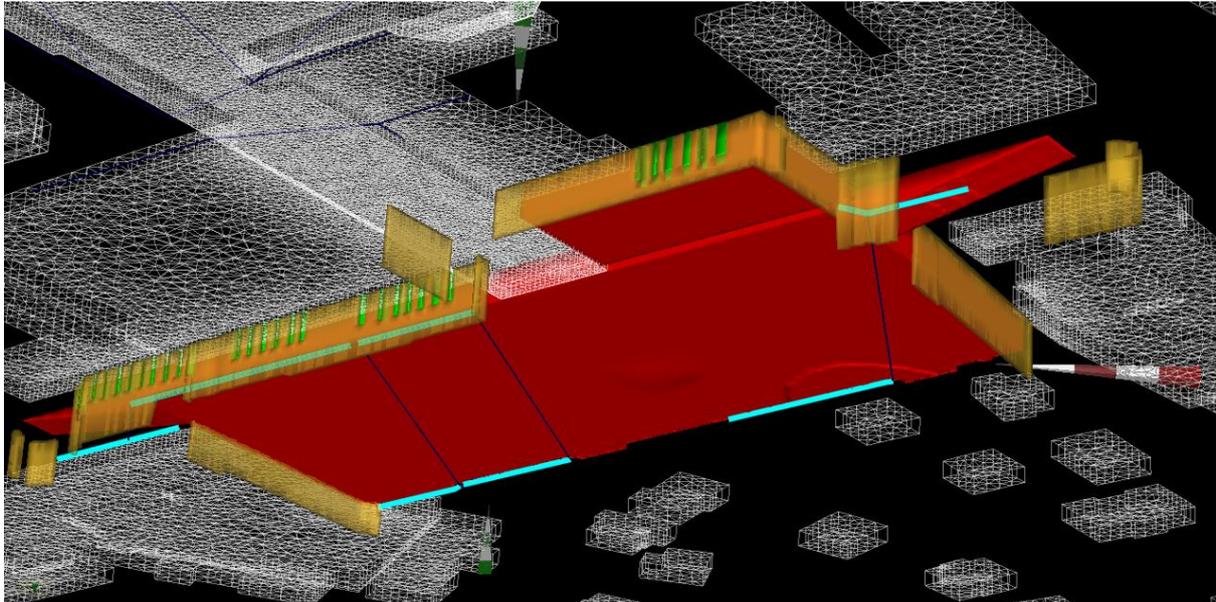


Abb. 6: 3D-Ansicht im FEFLOW-Grundwassermodell der geplanten Tiefgarage (rot), umschließender Dichtwand (gold) inkl. lokaler Überbohrung (grün) und geplanten Dükersträngen (türkis).

Die technische Lösung in Form von Grundwasserdüchern in Kombination mit komplexen 3D-Grundwassermodellen ermöglicht somit die Umsetzung bisher nicht realisierbarer Bauvorhaben ohne schädliche Auswirkungen auf den natürlichen Grundwasserstrom oder benachbarter Bebauung. Dabei können der Aufwand der Planung und die tatsächlichen Herstellungskosten durch Optimierungsläufe im Grundwassermodell bestmöglich reduziert werden.

Literatur

- Diersch, H-J., 2014. FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin Heidelberg.
- Glitsch, W. und Spang, C., 2009. Grundwasserkommunikationsanlagen zur Beherrschung von Aufstau und Sunk am Beispiel des City Tunnel Leipzig. In: Taschenbuch Tunnelbau 2008.
- Huttner, P. und Keilholz, P., 2020. 3-dimensionale Modellierung der Grundwasserstände an der Tiefgarage Egerlandstraße.

Hydrodynamische N-A-Ensemblesimulationen mit variablen räumlich-zeitlichen Verteilungen von Starkniederschlägen

Franziska Tügel, Elsa Kronke, Katrin Nissen, Pia Gronau, Lennart Steffen, Uwe Ulbrich, Reinhard Hinkelmann

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags werden für ein Teilgebiet der Stadt Berlin in Deutschland mit dem an der TU Berlin entwickelten robusten Flachwassermodell *hms++* die Überflutungen untersucht, die aus an der FU Berlin durchgeführten Ensemble-Simulationen räumlich-zeitlich variabler Starkregenereignisse resultieren. Die simulierten maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten werden untereinander sowie mit denen eines mit Radardaten beobachteten und eines statistischen Starkregenereignisses verglichen. Der spezifische Abfluss als Produkt von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit wird herangezogen, um das Gefährdungspotential der auftretenden Strömungen für Fußgänger*innen anhand von Grenzwerten aus der Literatur abzuschätzen. Die hier gezeigten Ergebnisse sollen die Methode vorstellen und stellen keine endgültige Bandbreite an Ereignisschweregraden dar. Um ein breiteres Bild möglicher Überflutungsszenarien zu erhalten, müssten weitere Ereignisse – z.B. in Form von weiteren beobachteten Starkregenereignissen, Ensemble-Resimulationen oder statistischen Ereignissen mit anderen Dauerstufen oder zeitlichen Verteilungen – simuliert werden.

1. Einführung

Starke Regenfälle und daraus resultierende Überschwemmungen führen überall auf der Welt zu schwerwiegenden Folgen. Die klimawandelbedingte Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen sowie die zunehmende Urbanisierung führen zu steigenden Risiken im Zusammenhang mit Starkregen und Sturzfluten. Während für die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten üblicherweise statistische Niederschlagsereignisse betrachtet werden, wird hier der Ansatz verfolgt, mögliche Variationen historischer Niederschlagsereignisse zu simulieren und deren Auswirkungen in Form von städtischen Überflutungen zu untersuchen. Kleinräumige Starkregenereignisse können sich unter denselben großräumigen atmosphärischen Anfangsbedingungen unterschiedlich entwickeln. Ensemble-Resimulationen vergangener Starkregenereignisse können die Bandbreite möglicher Niederschlagsentwicklungen und Ereignisschweregrade erfassen. Die verschiedenen Niederschlagsentwicklungen werden als Input für hydro-numerische Simulationen mit dem robusten 2D Flachwassermodell *hms++* verwendet, um die aus den Starkregenereignissen resultierenden Überflutungen zu erhalten. Zusätzlich werden reprozessierte, an Stationsdaten angeeichte Radardaten des Deutschen Wetterdienstes sowie ein statistisches Niederschlagsereignis nach KOSTRA-DWD-2020 als Niederschlagsinput verwendet, um räumliche Verteilungen maximaler Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten der verschiedenen Niederschlagsereignisse zu vergleichen. Der spezifische Abfluss als Produkt von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit wird zur Einschätzung des Einflusses der simulierten Strömungen auf die Stabilität von Fußgänger*innen herangezogen, um somit neben den Überflutungstiefen und -flächen einen weiteren Aspekt des Gefahrenpotentials von Starkregen und daraus resultierenden (städtischen) Überflutungen zu quantifizieren.

2. Robustes 2D Flachwassermodell *hms++*

Das *Hydroinformatics Modeling System (hms)* ist eine am Fachgebiet für Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung der TU Berlin entwickelte Java-basierte Modellierungssoftware zur Simulation von Oberflächenströmungen und damit verbundener Prozesse, wie beispielsweise Stofftransport und Infiltration. Hierbei werden unter Anwendung der Finite-Volumen-Methode, einer expliziten Zeitdiskretisierung und robuster numerischer Methoden die tiefengemittelten Flachwassergleichungen numerisch gelöst. Die robusten Methoden sind notwendig, um komplexe Strömungsprozesse, wie sie beispielsweise bei Niederschlags-Abfluss-Simulationen auftreten, möglichst genau und ohne numerische Instabilitäten simulieren zu können. Simons (2020) bietet umfassende Informationen über die maßgeblichen Gleichungen und numerischen Methoden. Um die Rechenperformance des Simulationsprogramms zu verbessern, wird *hms* seit 2019 in einem neuen C++-Framework namens *hms++* reimplementiert (Steffen et al. 2020).

3. Verwendete Niederschlagsdaten

3.1 Ensemble-Resimulationen von Starkregenereignissen

Im Rahmen des CliWaC-Projekts (Climate and Water Under Change) wurden vergangene Starkregenereignisse in Berlin mit dem Konvektions-erlaubenden Regionalmodell COSMO-CLM (Rockel et al. 2008) mit einer Auflösung von 2,7 km x 2,7 km re-simuliert. Alle Simulationen wurden durch eine dynamische Regionalisierung der gleichen großräumigen atmosphärischen Ausgangssituation basierend auf der ERA5-Reanalyse erzeugt. Die ERA5-Reanalyse ist die neueste vom *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* erstellte globale Klima-Reanalyse, welche Beobachtungsdaten und Wettermodelle kombiniert, um konsistente Zeitreihen verschiedener Klimavariablen zu erstellen (Copernicus, 2023). Durch Anwendung des "Domain-Shift" Verfahrens (Mazza et al. 2017) wurden Ensemble-Simulationen von 9 räumlich-zeitlichen Niederschlagsentwicklungen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten generiert. Jede Realisierung ist dabei gleich wahrscheinlich und hätte unter den gegebenen Anfangsbedingungen in der Realität auftreten können. In der hier gezeigten Arbeit wurde die großräumige atmosphärische Anfangssituation vom 01.06.2018 verwendet, welche in Berlin zu einem Starkregenereignis führte

3.2 RADKLIM

Zusätzlich zu den Ensemble-Simulationen wurde das Ereignis vom 01.06.2018 mit 5-Minuten-Niederschlagsraten des RADKLIM-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes (reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), Winterrath et al. 2018) als Niederschlagsinput für eine weitere Niederschlags-Abfluss-Simulation verwendet. Die räumliche Auflösung der RADKLIM-Daten beträgt 1 km x 1 km. Abbildung 1 zeigt für ein ca. 360 km² großes Modellgebiet in der Stadt Berlin die verschiedenen räumlichen Verteilungen der Niederschlagssummen der 9 Ensemble-Simulationen sowie der RADKLIM-Daten des Ereignisses vom 01.06.2018. Das beobachtete Ereignis (RADKLIM) zeigt hier deutlich kleinere Niederschlagssummen und ein anderes Zentrum im Vergleich zu den Ensemble-Simulationen.

3.3 KOSTRA

Ein häufig zur Erstellung von Starkregengefahren- oder -hinweiskarten angesetztes statistisches Starkregenereignis ist das 1-stündige Ereignis mit einer statistischen Wiederkehrzeit von 100 Jahren nach den KOSTRA-Daten des Deutschen Wetterdienstes. Die für die Erstellung von Starkregengefahrenkarten verwendete Dauerstufe von 1 Stunde wird beispielsweise auch im *Leitfaden Kommunales Starkregenerisikomanagement in Baden-Württemberg* (LUBW, 2016) angegeben. In dieser Arbeit wurde die zeitliche Verteilung des häufig angesetzten Modellregens Euler Typ II verwendet. Die Niederschlagssummen zur Konstruktion des Modellregens basieren hierbei auf dem Datensatz KOSTRA-DWD-2020. Der Modellregen wurde in dieser Arbeit als räumlich konstant angesetzt und es wurden die Werte für die Zelle gewählt, welche innerhalb Berlins die maximale Niederschlagssumme für das Ereignis mit der Dauerstufe von 1 Stunde und der statistischen Wiederkehrzeit von 100 Jahren aufweist. Die Zelle liegt zwar außerhalb des hier betrachteten ca. 360 km² großen Ausschnitts von Berlin, wurde aber gewählt, da sie für Berlin gesamt betrachtet den kritischsten Wert aufzeigt. Die Niederschlagssumme des betrachteten Ereignisses beträgt 49,3 mm, welches als räumlich konstant angesetzter Wert sowohl den Maximal- als auch den Mittelwert darstellt. Somit ist die nach KOSTRA-DWD angesetzte Niederschlagssumme zwar deutlich kleiner als der Maximalwert des Ensembles (73,5 mm), liegt allerdings etwas über dem räumlichen Mittelwert der aggregierten Maximalwerte für das gesamte Ensemble mit 44,3 mm. Die Unsicherheit für dieses Ereignis und die gewählte Zelle liegt nach KOSTRA-DWD-2020 bei $\pm 27\%$, welche jedoch zunächst nicht in die hier gezeigten Berechnungen mit aufgenommen wurde.

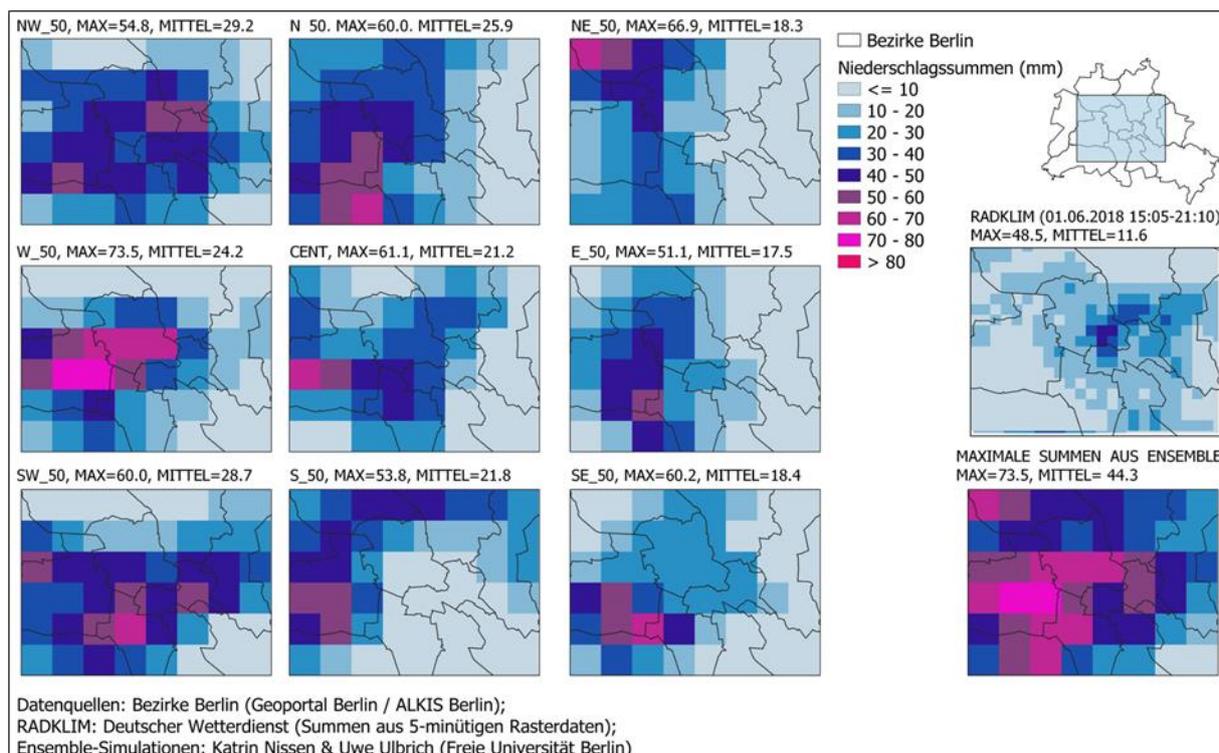


Abb. 1: Niederschlagssummen der 9 Ensemble-Simulationen sowie der RADKLIM-Daten zum Starkregenereignis am 01.06.2018. Unten rechts: zellweise max. Summe aus Ensemble

Modellaufbau

Ein 2D-hydrodynamisches Niederschlags-Abfluss-Modell wird verwendet, um die Auswirkungen der verschiedenen Niederschlagsereignisse in Form von städtischen Überflutungen zu untersuchen. Das gewählte Modellgebiet von etwa 360 km² wurde mit ca. 3,6 Mio. quadratischen Zellen der Größe 10 m x 10 m räumlich diskretisiert. Das digitale Geländemodell wurde aus ATKIS-Daten erstellt (Geoportal Berlin / ATKIS® DGM - Digitales Geländemodell). Die Gebäudehöhen entstammen zum Teil dem Umweltatlas Berlin / Gebäudehöhen. Die Gebäude, die nicht in diesem Datensatz enthalten sind, wurden aus OpenStreetMap-Daten der Geofabrik GmbH entnommen und deren Höhen pauschal auf 10 m über Geländeoberfläche im DGM gesetzt. Diese Gebäudehöhen wurden direkt in das digitale Höhenmodell integriert. Die Reibungsbeiwerte nach Manning wurden abhängig von der Flächennutzungsart nach ALKIS (Geoportal Berlin / ALKIS Berlin) im Wesentlichen basierend auf angegebenen Werten zur Erstellung der Starkregenhinweiskarten für NRW (LANUV NRW 2022) räumlich verteilt zugeordnet und gerastert. Das Kanalnetz sowie die Versickerung wurden in dieser Arbeit vernachlässigt. Als Anfangsbedingung wurde das gesamte Modellgebiet als trocken angenommen. Die Randbedingungen an den Modellrändern wurden so gesetzt, dass ein freier Abfluss über die Ränder möglich ist. Die zeitliche Auflösung der verschiedenen Niederschlagsdaten betrug 5 Minuten. Die Simulationszeit für die verschiedenen Simulationen variierte zwischen 1,4 (KOSTRA), 3 - 4,5 (Ensemble) und 6,3 Stunden (RADKLIM). Ein Großteil der Datenvorbereitung sowie ein Teil der Auswertung der Ergebnisse wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit an der TU Berlin unter Anwendung der Software QGIS und Paraview durchgeführt (Kronke 2023). Unterschiedliche Modellauflösungen wurden im Rahmen einer anderen Bachelorarbeit an der TU Berlin untersucht und eine Zellgröße von 10 m für die gegebene Zielstellung als ausreichend erachtet, da hierbei die meisten Straßen und Hauptfließwege aufgelöst werden (Gronau 2023). Außerdem sollte für diese erstmalige 2D-hydrodynamische Modellierung eines großen Gebietes von Berlin die Rechenzeit und der Bearbeitungsaufwand für die Auswertung der Ergebnisse in einem vertretbaren Rahmen bleiben. Beides ist bei kleiner werdender Zellgröße mit deutlich mehr Aufwand verbunden. Für genauere Betrachtungen einzelner Gebiete sollte eine höhere Auflösung gewählt werden und ggf. das Kanalnetz durch eine 1D/2D-Modellkopplung integriert werden.

5. Ergebnisse

5.1 Wassertiefen

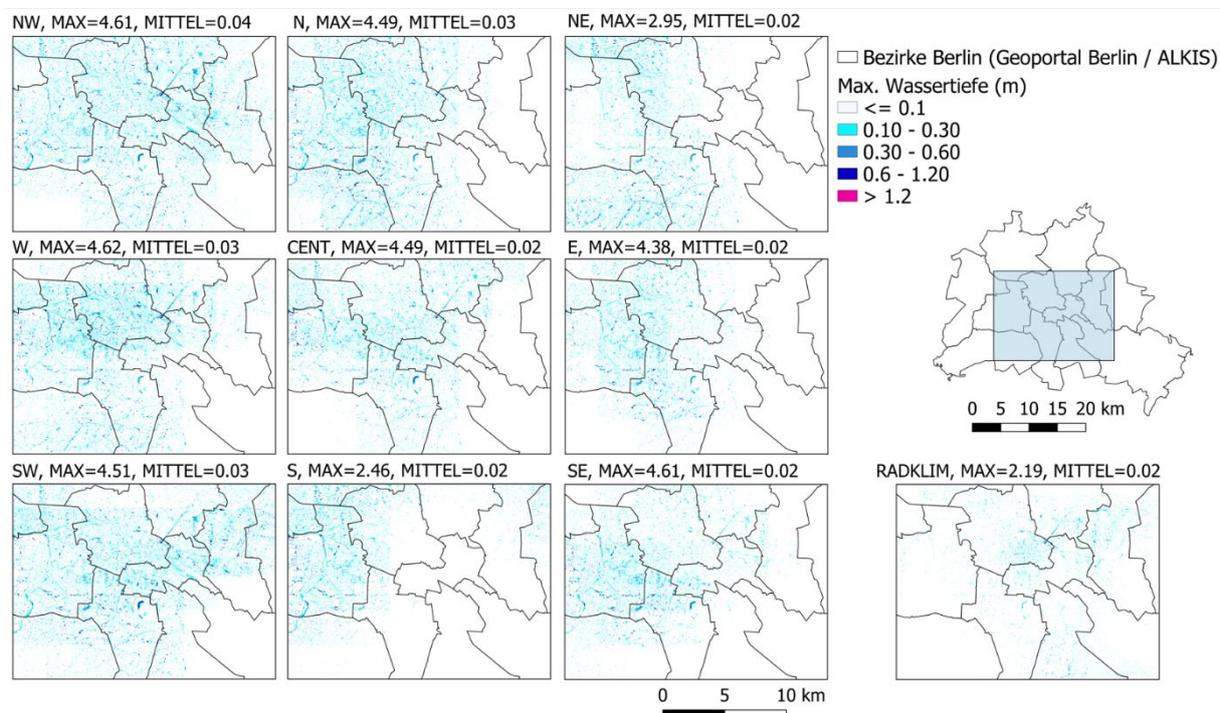


Abb. 2: Max. Wassertiefen für jede Ensemble-Simulation und RADKLIM-Ereignis

Abbildung 2 zeigt die räumlichen Verteilungen der über die gesamte Simulationszeit aufgetretenen maximalen Wassertiefen für jede Ensemble-Simulation sowie für die Simulation mit RADKLIM-Daten. Aufgrund der räumlichen Variabilität der Niederschläge ergeben sich unterschiedliche Verteilungen der maximalen Wassertiefen. Für jede Simulation sind neben der räumlichen Verteilung auch die im Gebiet auftretenden Maximalwerte sowie die durchschnittlichen Werte über das Modellgebiet angegeben. Die Maximalwassertiefe im Modellgebiet variiert für die verschiedenen Ensemble-Simulationen zwischen 2,46 m für das Ereignis S und 4,62 m für das Ereignis W. Allerdings muss hier erwähnt werden, dass die besonders großen Wassertiefen im Modell oftmals mit einer unzureichenden Darstellung des Geländes im DGM zusammenhängen, bspw. dass Fließpfade aufgrund von Tunneln oder kreuzenden Hochstraßen nicht adäquat abgebildet werden und in den hier gezeigten Ergebnissen nicht mit besonderen Methoden berücksichtigt wurden. Die Durchschnittswerte der maximalen Wassertiefen fallen mit 0,02 – 0,04 m sehr klein aus, da ein Großteil der Zellen keine oder nur sehr kleine Wassertiefen aufweist, weil in den verschiedenen Ereignissen jeweils nur ein Teil des Modellgebiets beregnet wurde. Wie bereits in Abbildung 1 deutlich wurde, fallen die Niederschlagssummen im mit RADKLIM-Daten beobachtete Ereignis am kleinsten aus, was auch zu dem kleinsten Wert der Maximalwassertiefe im Modellgebiet von 2,19 m führt.

Um die räumliche Abdeckung für das Gesamtgebiet besser abzubilden und die maximalen Wassertiefen aus allen Simulationen zum 01.06.2018 (Ensemble und RADKLIM) zu erfassen, zeigt Abbildung 3 die aggregierten maximalen Wassertiefen aus allen 9 Ensemble-Simulationen und der Simulation mit RADKLIM-Daten. Diese räumliche Verteilung der Maximalwerte wird mit den maximalen Wassertiefen für das statistische Niederschlagsereignis nach

KOSTRA verglichen. Daraus wird deutlich, dass in den aggregierten Maximalwerten aus 9 Ensemble-Simulationen und dem RADKLIM-Ereignis teilweise lokal etwas größere Überflutungsflächen mit größeren Wassertiefen auftreten als im KOSTRA-Ereignis, während vor allem im südöstlichen Teil des Modellgebiets kleinere Wassertiefen auftreten und ein Großteil ganz trocken ist bzw. Wassertiefen < 0.1 m aufweist, da die räumlich variablen Ereignisse hier keinen oder nur geringen Niederschlag zeigten. Die gesamte Maximalwassertiefe liegt mit 4,62 m für das aggregierte Ergebnis sehr nah an dem Wert für das KOSTRA-Ereignis mit 4,58 m, wobei diese großen Wassertiefen wie bereits erwähnt in den meisten Fällen auf eine unzureichende Repräsentation des Geländes im Modell zurückzuführen sind. In Abbildung 3 wird ebenfalls deutlich, dass der Ansatz mit den Ensemble-Simulationen lokal zu größeren und tieferen Überflutungen führt, während das räumlich konstante KOSTRA-Ereignis fast im gesamten Gebiet Wassertiefen > 0.1 m aufweist.

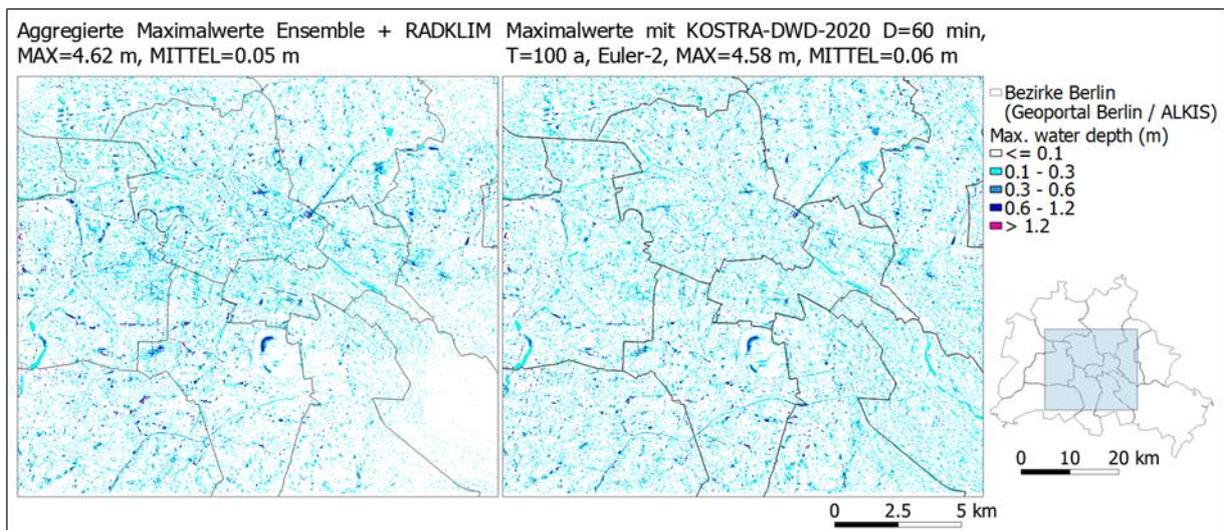


Abb. 3: Max. Wassertiefen aggregiert aus Ensemble und RADKLIM (links) und für das KOSTRA-Ereignis (rechts)

In Abbildung 4 sind die Differenzen zwischen KOSTRA und den aggregierten Maximalwerten aus dem Ensemble und dem RADKLIM-Ereignis dargestellt. Hier wird nochmal deutlicher, dass vor allem im Zentrum und im westlichen Teil des Modellgebiets die maximalen Wassertiefen aus dem Ensemble und dem RADKLIM-Ereignis die des KOSTRA-Ereignisses übersteigen, während das KOSTRA-Ereignis vor allem im süd- und nordöstlichen Teil des Modellgebiets zu höheren Wassertiefen führt. In einem Großteil des Modellgebiets (weiß dargestellt) liegen die Differenzen bei ± 10 cm und kleiner.

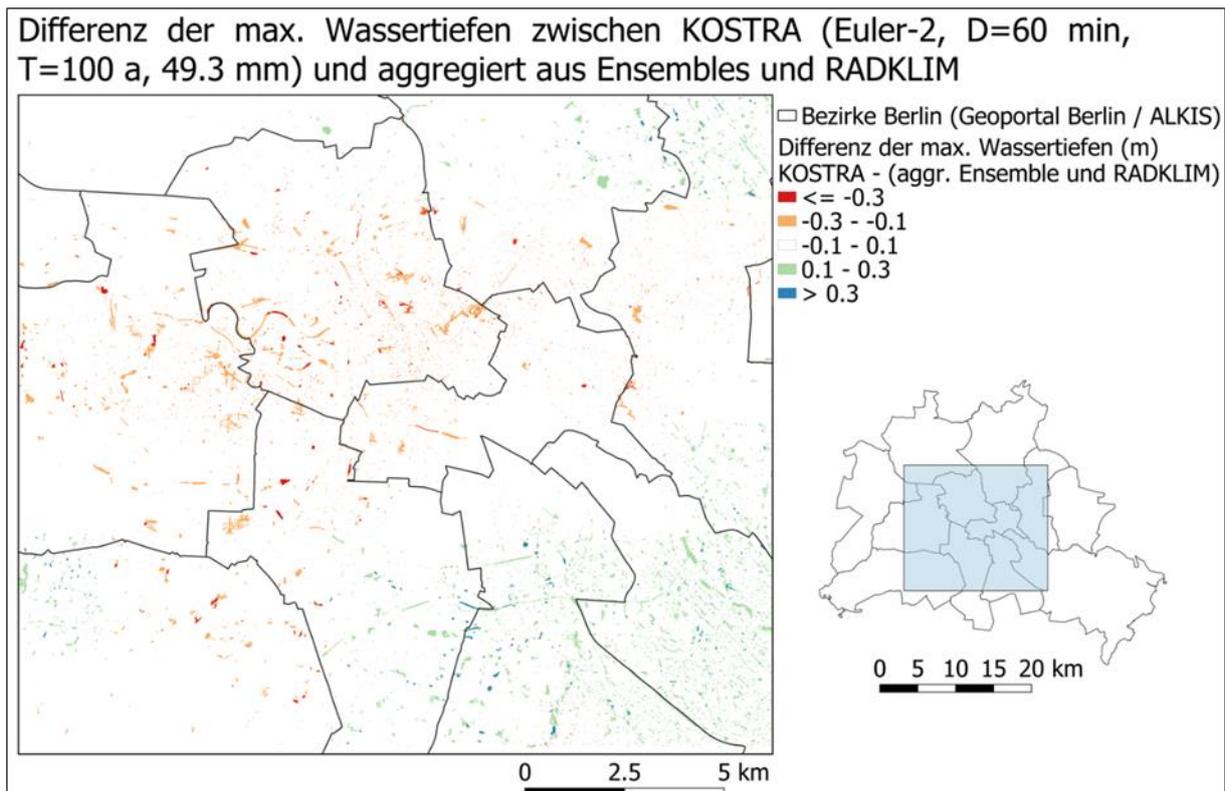


Abb. 4: Differenzen der max. Wassertiefen zwischen KOSTRA-Ereignis und aggregiertem Ergebnis aus Ensemble und RADKLIM

5.2 Fließgeschwindigkeiten

Abbildung 5 zeigt die räumliche Verteilung der über die gesamte Simulationszeit auftretenden maximalen Fließgeschwindigkeiten für jede Ensemble-Simulation sowie für die Simulation mit RADKLIM-Daten. Die maximale Fließgeschwindigkeit im Modellgebiet variiert für die verschiedenen Ensemble-Simulationen zwischen 1,37 m/s für das Ereignis S und 2,23 m/s für das Ereignis E. Die Durchschnittswerte der maximalen Fließgeschwindigkeiten fallen mit 0,04 – 0,05 m/s sehr klein aus, da in den verschiedenen Ereignissen jeweils nur ein Teil des Modellgebiets beregnet wurde. Die Fließgeschwindigkeit des mit RADKLIM-Daten simulierten Ereignisses liegt mit einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 1,52 m/s zwischen dem kleinsten und dem größten Wert der maximalen Fließgeschwindigkeit des Ensembles.

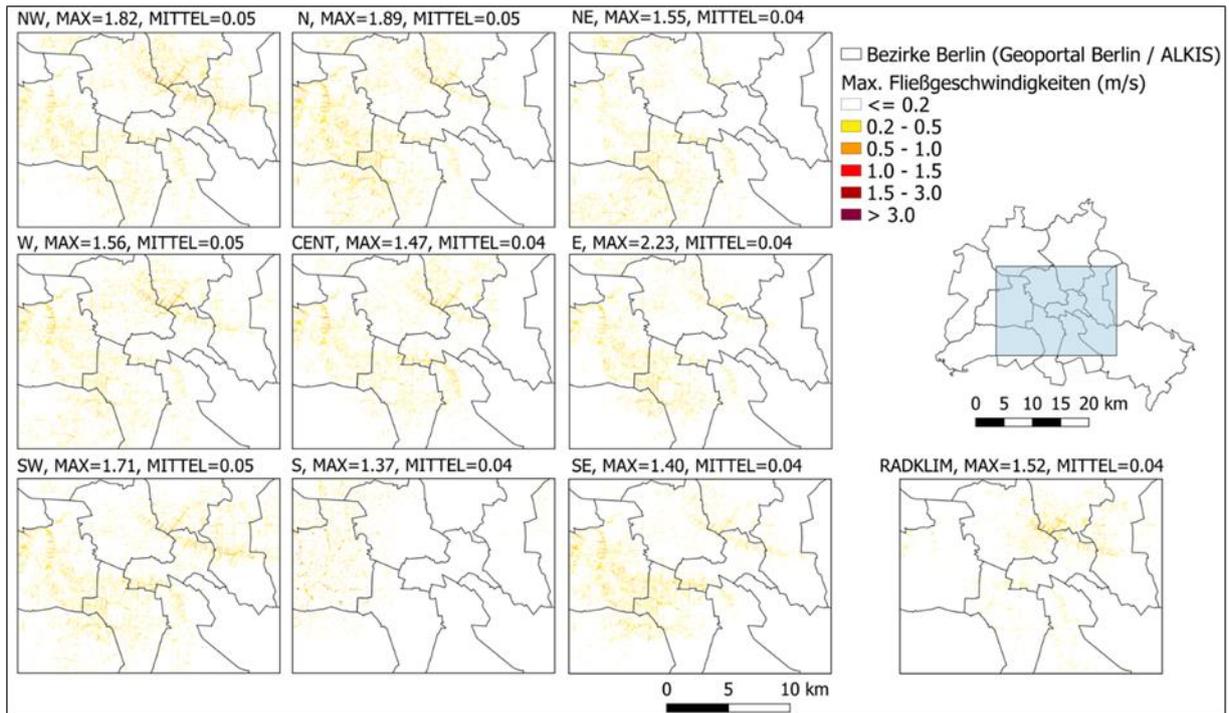


Abb. 5: Max. Fließgeschwindigkeiten für jede Ensemble-Simulation und RADKLIM-Ereignis

Abbildung 6 zeigt die aggregierten maximalen Fließgeschwindigkeiten aus allen 9 Ensemble-Simulationen und der Simulation mit RADKLIM-Daten und die des hier verwendeten KOSTRA-Ereignisses im Vergleich, welcher zeigt, dass die im Modellgebiet auftretende maximale Geschwindigkeit für beide Ansätze sehr ähnlich ausfällt, mit 2,23 m/s für das aggregierte Ergebnis aus Ensemble-Simulationen und RADKLIM und 2,19 m/s für das KOSTRA-Ereignis. Vor allem im Fall des räumlich konstant angenommenen KOSTRA-Ereignisses spiegelt sich in der räumlichen Verteilung der Fließgeschwindigkeiten die örtliche Topografie wider. So treten besonders hohe Fließgeschwindigkeiten an den Grenzen des Berliner Urstromtals auf. Aus den hier nicht gezeigten Differenzen zwischen den maximalen Fließgeschwindigkeiten des KOSTRA-Ereignisses und des aggregierten Ergebnisses wird deutlich, dass das Ergebnis mit dem KOSTRA-Ereignis für einen Großteil des Gebietes größere Fließgeschwindigkeiten aufweist, das aggregierte Ergebnis aus Ensemble und RADKLIM-Daten hingegen in einigen Bereichen im Zentrum und im westlichen und nordwestlichen Teil des Modellgebiets höhere Fließgeschwindigkeiten zeigt.

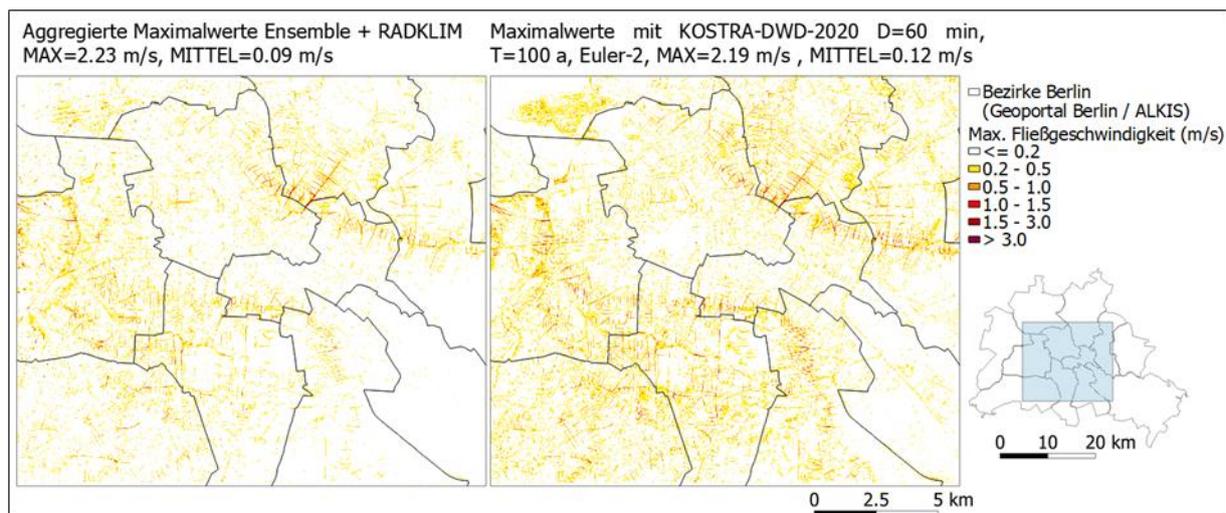


Abb. 6: Max. Fließgeschwindigkeiten aggregiert aus Ensemble und RADKLIM (links) und für KOSTRA-Ereignis (rechts)

5.3 Oberflächenabfluss und Abschätzung des Gefährdungspotentials

Die Kombination aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit bestimmt, wie gefährlich eine Strömung für beispielsweise Fußgänger*innen sein kann, die sich zum Zeitpunkt des Ereignisses auf der Straße bewegen. In der Literatur existieren verschiedene Methoden zur Einschätzung des Einflusses städtischer Überflutungen auf die Stabilität von Fußgänger*innen. Eine Möglichkeit ist es, Grenzwerte für den spezifischen Abfluss bzw. Oberflächenabfluss in m^2/s als Produkt aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit empirisch über physikalische Laborversuche im Maßstab 1:1 zu ermitteln. So wurde z.B. in Martínez-Gomariz et al. (2016) anhand physikalischer Laborversuche ein Grenzwert von Wassertiefe x Fließgeschwindigkeit von $0,22 \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt, bei dessen Überschreitung die Stabilität von Fußgänger*innen nicht mehr gewährleistet ist. Hierbei wurden möglichst viele verschiedene Strömungsfälle untersucht und explizit auch Fälle mit kleineren Wassertiefen und größeren Fließgeschwindigkeiten berücksichtigt, welche im Fall von städtischen Überschwemmungen aus Starkregen häufig vorkommen können. Musolino et al. (2020) verglichen verschiedenen empirischen Methoden wie auch die in Martínez-Gomariz et al. (2016) beschriebene Methode mit einer auf einer vollständigen physikalischen Analyse der im Überflutungsfall auf einen Körper wirkenden Kräfte basierenden Methode. Die Ergebnisse zeigten, dass für die von ihnen untersuchten Überflutungsfälle alle betrachteten empirischen Methoden bis auf die nach Martínez-Gomariz et al. (2016) die Überflutungsgefährdung nach der physikalisch-basierten Methode unterschätzten. Aus diesem Grund und da der Grenzwert für den spezifischen Abfluss eine einfache Methode zur Einschätzung des Gefährdungspotentials darstellt, werden in Abbildung 7 die räumlichen Verteilungen des maximalen Oberflächenabflusses als aggregiertes Ergebnis aus den Ensemble-Simulationen und dem RADKLIM-Ereignis und des KOSTRA-Ereignisses dargestellt. Im Großteil des Gebietes zeigen die Ergebnisse beider Ansätze Abflusswerte von $\leq 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ und in vielen Bereichen Werte zwischen $0,05\text{-}0,22 \text{ m}^2/\text{s}$. Der Grenzwert für die Stabilität von Fußgänger*innen von $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ wird nur in einzelnen Straßen überschritten und ist in Abbildung 7 mit orange bis roter Farbe gezeigt. Einige dieser Straßen mit Abflusswerten $> 0,22 \text{ m}^2/\text{s}$ sind in den Details

auf der linken Seite in Abbildung 7 in größeren Maßstäben gezeigt. Die Verteilungen und Werte fallen für beide Ansätze sehr ähnlich aus. Für das Gesamtgebiet zeigt das aggregierte Ergebnis in einigen Bereichen lokal höhere Werte, wobei bei dem Ergebnis für das KOSTRA-Ereignis erwartungsgemäß höhere Werte im östlichen Teil des Modellgebiets auftreten.

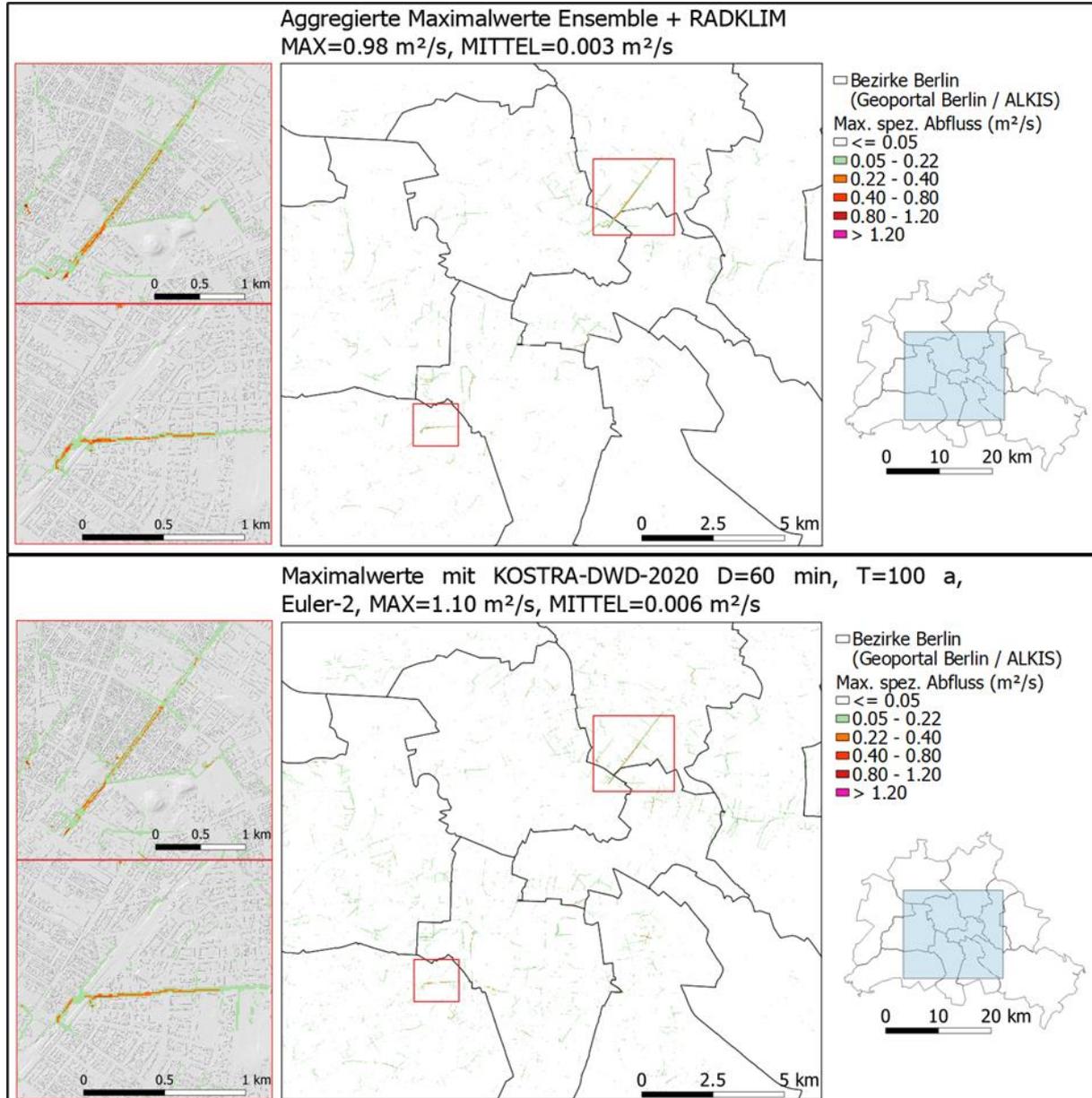


Abb. 7: Maximale Oberflächenabflüsse aus dem aggregierten Ergebnis von Ensemble und RADKLIM und dem KOSTRA-Ereignis. Hintergrund in Detailansichten: DGM1 (Geoportal Berlin / ATKIS® DGM - Digitales Geländemodell) mit integrierten Gebäuden

6. Ausblick

Insgesamt wurde das Ziel verfolgt, mit den Ensemble-Simulationen eine mögliche Bandbreite von Ereignisschweregraden und deren Auswirkungen in Form städtischer Überflutungen zu untersuchen, um die mit der starken Variabilität von Starkniederschlägen einhergehenden Unsicherheiten zu berücksichtigen. Die Ergebnisse werden noch weiter ausgewertet, u.a. hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Überflutungen aus den unterschiedlichen Starkregenereignissen. Diese Ergebnisse sowie Simulationen weiterer Starkregenereignisse könnten außerdem als Datengrundlage für eine KI-basierte Echtzeitvorhersage dienen. Das Modell soll zukünftig auch zur Untersuchung möglicher Anpassungsmaßnahmen wie beispielweise Entsiegelung, Gründächern, Infiltrations- und Rückhaltebecken verwendet werden, wobei hierfür geeignete Ansätze für Infiltration und Retention in das Modell integriert werden. Auch die Berücksichtigung des Kanalnetzes und weiterer wasserwirtschaftlicher sowie urbaner Infrastruktur für detailliertere Betrachtungen einzelner Hotspots ist in der Entwicklung.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Einstein Stiftung Berlin und der Berlin University Alliance im Rahmen des Projektes „Climate and Water Under Change“ (CliWaC) gefördert. Die meteorologischen Simulationen wurden am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) unter der Projekt ID bb1229 durchgeführt. Die Autoren bedanken sich für die vom Resource Allocation Board gewährte Rechenzeit, die auf den Supercomputern Lise und Emmy am NHR@ZIB und NHR@Göttingen als Teil der NHR-Infrastruktur bereitgestellt wurde.

Literatur

- Copernicus, 2023: Online-Quelle, URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (Letzter Zugriff: 13.03.2023)
- Gronau, P., 2023. Hydrodynamische Niederschlags-Abfluss-Simulationen für Gesamt-Berlin und Untersuchungen zur geeigneten Gitterauflösung. Bachelorarbeit, TU Berlin.
- LANUV NRW, 2002. Online-Quelle, URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaanpassung-in-nrw/fis-klimaanpassung-nordrhein-westfalen/hochwasserschutz/parameter> (Letzter Zugriff: 14.10.2022)
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 2016. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
- Kronke, E., 2023. Hydrodynamische N-A-Ensemblesimulationen mit verschiedenen räumlich-zeitlichen Verteilungen von Starkniederschlägen zur Untersuchung von Überflutungsflächen in einem Teilgebiet von Berlin. Bachelorarbeit, TU Berlin.
- Mazza, E., Ulbrich, U., Klein, R., 2017. The Tropical Transition of the October 1996 Medicane in the Western Mediterranean Sea: A Warm Seclusion Event. Monthly Weather Review, pp. 2575-2595, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0474.1>
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., 2016. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. Nat Hazards 82, 1259-1278, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2242-z>

- Musolino, G., Ahmadian, R., Falconer, R.A., 2020. Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method. *Journal of Hydrology X* 9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100067>
- Rockel, B., Will, A., Hense, A., 2008. The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17(4), 347-348, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>
- Steffen, L., Tügel, F., Hinkelmann, R., 2022. The Shallow Water Model Intercomparison Session: Hydroinformatics Modeling System (hms/hms++). 39th IAHR World Congress, Granada, Spain, <https://www.iahr.org/library/infor?pid=21669>
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Lengfeld, K., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2018. RADKLIM Version 2017.002: Reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), 5-Minuten-Niederschlagsraten (YW), https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_YW_V2017.002

Nachhaltige Speicherbewirtschaftung durch Integrierte Wasserhaushaltsmodellierung mit MIKE SHE während langjähriger Trockenperioden

Philipp Huttner, Katja Eulitz, Patrick Keilholz

Zusammenfassung

Der voranschreitende Klimawandel erfordert eine angepasste Speicherbewirtschaftung von großen Seenspeichersystemen in Deutschland. Hält eine Niedrigwasserperiode über mehrere Jahre an, wie es in den Jahren 2018 bis 2020 der Fall war, reichen die bestehenden Speichervolumina nicht mehr aus, um ausreichend Wasser aus feuchten Jahren aufzunehmen und dauerhaft die erforderlichen Wasserabgaben zu gewährleisten. Zur Verbesserung der Entscheidungsgrundlage für Wasserbehörden auf Landesebene bietet sich der Einsatz von integrierten Wasserhaushaltsmodellen an. Diese Modelle simulieren alle Kompartimente des Wasserkreislaufs, einschließlich der fließgewässerscharfen Abbildung von Oberflächenabflussprozessen und Grundwasser. Insbesondere im Hinblick auf die Niedrigwasserproblematik können somit alle notwendigen Ergebnisse ermittelt werden.

1. Fragestellung und Modellgebiet

1.1 Speicherbewirtschaftung und Niedrigwasserproblematik

Die Speicherbewirtschaftung erforderte bereits in der Vergangenheit eine umfassende Kenntnis aller relevanten Wasserhaushaltsgrößen insbesondere deren Schwankung über mehrere Jahre hinweg. Idealerweise erfolgt die Bemessung des notwendigen Speichervolumens bei der Errichtung bzw. der Planung mittels des sogenannten Folge-Scheitel-Algorithmus, kurz FSA (engl.: „Sequent-Peak-Algorithm“, kurz: SPA). Hier werden alle realen Zuflüsse mit allen realen Abflüssen inkl. geplanter Abgaben aufsummiert. Je größer und komplexer das zu bewirtschaftende Einzugsgebiet, desto schwieriger gestaltete sich die Auswertung. Deshalb mussten oft vereinfachte Annahmen für messtechnisch schwierig zu erfassende Größen wie Verdunstung und Grundwasserzufluss getroffen werden.

Für die kurzfristige Steuerung eines Speichers während Hochwassersituationen reduzieren sich die relevanten Eingangsdaten, da Größen wie Verdunstung und Grundwasserzufluss meist eine zu vernachlässigende Rolle gegenüber dem konzentrierten Direktabfluss in Gewässern, dem Niederschlag und dem lateralen Oberflächenzufluss spielen. Für diese Bewirtschaftung reichen deshalb vereinfachte konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle, die meist auf GIS-basierten Ansätzen beruhen und viele Größen des Wasserhaushalts auf Basis simpler Linearspeicher abbilden (z.B. ArcEGMO, mGROWA18, GWN-BW).

Bei (langjährigen) Dürreperioden gewinnen diese auf der hydrologischen Zeitskala langsam fließenden Komponenten aber an Bedeutung für eine langfristig orientierte nachhaltige Seenspeicherbewirtschaftung. Der Basisabfluss muss für jedes Jahr je nach hydrologischen Gegebenheiten exakt berechnet werden, deshalb ist eine Modellierung des Grundwasserleiters und eine Kalibrierung an Grundwasserständen notwendig. Die Modelleinschränkungen der konzeptionellen Linearspeicher-Modelle können keine zufriedenstellenden Ergebnisse mehr liefern. Durch den Einsatz von „integrierten Wasserhaushaltsmodellen“ können alle realen Komponenten des Wasserkreislaufs auf Basis physikalischer Ansätze mit beliebiger räumlicher und zeitlicher Auflösung simuliert und bereitgestellt werden. Im Rahmen eines Projektbeispiels im Auftrag des Landesamts für Umwelt Brandenburg W23 (LfU BB) in der westlichen Uckermark

ermöglichte der Einsatz des integrierten Wasserhaushaltsmodells MIKE SHE die Quantifizierung der relevanten Prozesse und Bilanzgrößen zur Bewirtschaftung des Seenspeichersystems „Hardenbecker Haussee, Boitzenburger KÜchenteich und Schumellensee“.

1.2 Untersuchungsgebiet

In der westlichen Uckermark an der Grenze zwischen Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern befindet sich der Seenspeicher „Hardenbecker Haussee, Boitzenburger KÜchenteich und Schumellensee“ (kurz: „HKS-System“). Das Seenspeichersystem ist Teil eines komplexen, anthropogen geprägten Seensystems im Einzugsgebiet (EZG) der Ucker im Landkreis Uckermark. Die oberirdische Wasserscheide zwischen den EZG Ucker und Havel verläuft westlich des Hardenbecker Haussees, die gleichzeitig die Hauptwasserscheide zwischen der Ost- und Nordsee bildet. Das Gebiet ist hydrogeologisch sehr komplex und durch eine starke Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässersystem geprägt. Die Wasserabgaben an die beiden konkurrierenden Teileinzugsgebiete erfolgen manuell über zwei Schützenwehre, welche teilweise sowohl ober- als auch unterschlüchtig gefahren werden. Neben der Frage nach dem real verfügbarem Wasserdargebot mussten ebenfalls die bestehenden Wassernutzungen geklärt werden, welche neben kleineren Grundwasserentnahmen auch die Ermittlung der ökologischen Mindestabflüsse sowie die Anforderungen der Fischerei und für touristische Bootsfahrten umfassen. Im Auftrag des LfU Brandenburg wurde ein integriertes Wasserhaushaltsmodell aufgebaut, um die Fragen zum verfügbarem Wasserdargebot und der Optimierung der Speicherbewirtschaftung beantworten zu können. Hierfür wurde das Betrachtungsgebiet im ersten Schritt in vier Teileinzugsgebiete (TEZG) unterteilt, um die Zu- und Abflüsse für das HKS-System richtig abbilden zu können:

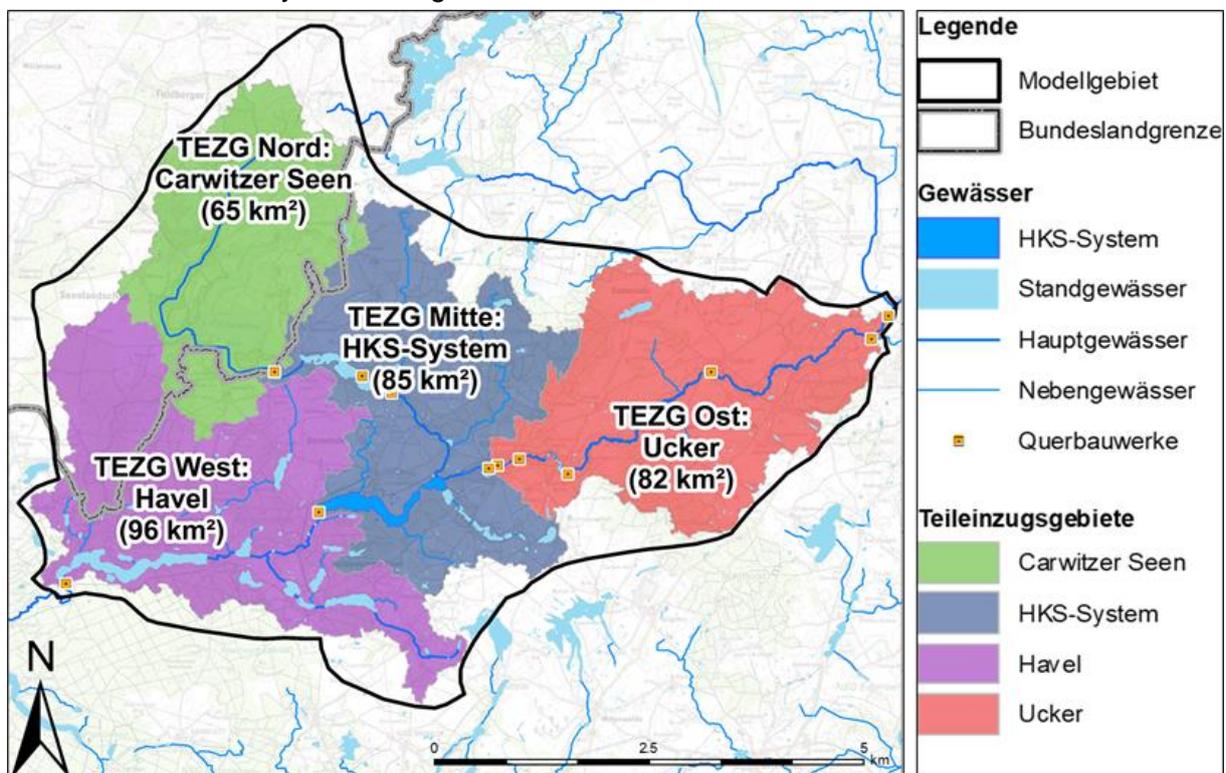


Abb. 1: Lage und Ausdehnung der vier betrachteten Teileinzugsgebiete.

2. Verwendetes Integriertes Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE

2.1 Funktionalität

Neben den herkömmlichen konzeptionellen hydrologischen Modellen, welche die letzten Jahrzehnte vorrangig auf Bundeslandebene eingesetzt wurden, ermöglichen integrierte Wasserhaushaltsmodelle deutlich detailliertere und belastbarere Ergebnisse, besonders für Niedrigwasserfragestellungen. Eine der heutzutage zuverlässigsten Methoden der indirekten Ermittlung des Dargebots ist die Simulation mit integrierten Wasserhaushaltsmodellen. Im Gegensatz zu den bisher gängigen Verfahren, werden die oberflächennahen Abflussprozesse nicht nur auf den Abfluss der Pegelmessstelle des nächstgelegenen Hauptgewässers kalibriert und die Parameter regionalisiert, es erfolgt auch eine stationäre und instationäre Kalibrierung auf Grundwasserstände, die in räumlich verteilten Grundwassermessstellen erfasst werden. Der Unterschied zwischen physikalisch basierten Modellen und den gängigen konzeptionellen Linienspeicher-Ansätzen besteht vor allem in der Diskretisierung und in der Nachbildung des Direktabflusses und den Prozessen in der ungesättigten und gesättigten Zone.

In den gängigen N-A-Modellen erfolgt ein Direktabschlag von Niederschlag unmittelbar an die Stelle der Pegelmessstelle des nächstgelegenen Hauptgewässers. Der räumliche Fließprozess und die Möglichkeit der Versickerung im Gebiet werden nicht abgebildet. Bei physikalisch basierten Modellen erfolgt ein hydronumerischer Ansatz, sodass nicht nur die echten hydraulischen Fließgesetze berücksichtigt werden (Berücksichtigung von Aufstau und Rückstau), sondern auch in jeder Rechenzelle geprüft wird, ob die maximale Infiltrationskapazität bereits erreicht ist oder ein Teil des diffusen Oberflächenabflusses wieder versickern kann. So kann Wasser aus versiegelten Flächen, bzw. mit gering durchlässigen Böden, in Bereichen mit Oberböden höherer hydraulischer Leitfähigkeit wiederversickern. Das Wasser kann also auf dem Weg zum Oberflächengewässer wieder versickern und andernorts wieder zur Grundwasserneubildung beitragen. Zusätzlich wird der Effekt der Rückkopplung von aktuellem Grundwasserstand auf die aktuelle Grundwasserneubildung mitberücksichtigt, welche vor allem bei Niedrigwassersituationen einen großen Einfluss hat.

Eine weitere Stärke der physikalisch basierten Modelle bezieht sich auf den Prozess der sättigungsabhängigen Leitfähigkeit in der ungesättigten Bodenzone. Im integrierten Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE wird die 1D-Richards-Gleichung berechnet, sodass die Saugspannungskurve für jeden Bodentyp abgebildet wird. So können im Sommer die Bodensäulen austrocknen und damit die Infiltrationsfähigkeit hemmen sowie die Bildung von Direktabfluss erhöhen.

Folgende Prozesse werden vollständig diskretisiert für die definierte Rasterzellauflösung simuliert:

- Niederschlag, Transpiration, Evaporation auf der Oberfläche, und Interzeptionsverluste,
- sättigungsabhängige Infiltration und Kapillaraufstieg innerhalb der schichtenbasierten ungesättigten Bodenzone auf Basis des 1D-Richards-Ansatzes inkl. Abbildung der Boden-Sättigungskurve,
- lateraler 2D-Oberflächenabfluss,
- fließgewässerscharfe 1D-Abflusskonzentration im integrierten Fließgewässermodell MIKE HYDRO River und Interaktion Gewässer/Grundwasser,

- 3D-Grundwasserfluss auf Basis der vollständigen Darcy-Gleichung inkl. punktueller Brunnenentnahmen und Gewässer-Grundwasseraustausch für jede einzelne Modellzelle.

2.2 Aufbau

Integrierte Wasserhaushaltsmodelle werden idealerweise an der Umhüllenden von ober- und unterirdischem Einzugsgebiet abgegrenzt, sodass möglichst wenige seitliche Zuflussrandbedingungen angenommen werden müssen und ein geschlossenes System entsteht. Im Idealfall sollten dabei Niederschlag und potenzielle Verdunstung die einzigen Randbedingungen sein. Neben den Eingangsdaten zur Modellierung des Wasserhaushalts wird zusätzlich ein fließgewässerscharfes 1D-Hydraulikmodell im integrierten Modul MIKE HYDRO River auf Basis von Fließquerschnitten und linearen Gewässertrassen aufgesetzt. Für die Abflussprozesse in der gesättigten Bodenzone wird ein vollständig diskretisiertes 3D-Grundwassermodell aufgebaut, anhand der vorliegenden Stratigraphie in Schichten unterteilt und mit Parametern für die hydraulische Leitfähigkeit und Speicherkoeffizienten versehen.

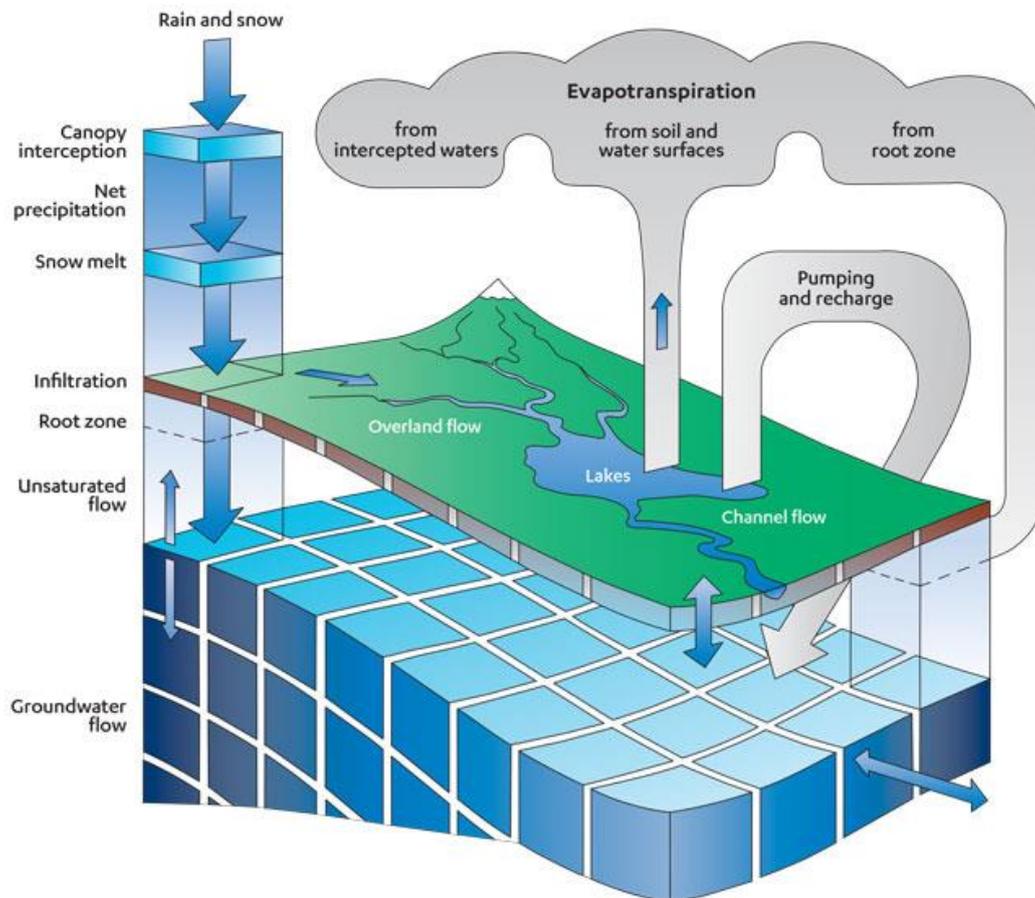


Abb. 2: Modellsystem MIKE SHE inkl. der berechenbaren Wasserhaushaltskomponenten.

2.3 Kalibrierung

Im ersten Schritt wurde das Modell auf eine gemeinsam mit dem LfU Brandenburg durchgeführte großräumige Stichtagsmessung (inkl. Wasserstands-/Abflussmessungen und Grundwasserstandsmessungen) bei stabilen Niedrigwasserverhältnissen stationär kalibriert. Anschließend erfolgte mit dem integrierten Wasserhaushaltsmodell eine instationäre Kalibrierung für den Zeitraum Wasserwirtschaftsjahre 2006 bis 2020. Hierbei konnten sowohl Abflüsse an Pegelmessstellen des Oberflächengewässersystems als auch die absoluten Höhen und steigenden sowie fallenden Trends der Ganglinien an mehreren Grundwassermessstellen simuliert werden. Somit wurden alle realen Prozesse des Wasserkreislaufs korrekt abgebildet und es kann eine präzise Bestimmung der ober- und unterirdischen Wasserdargebote erfolgen.

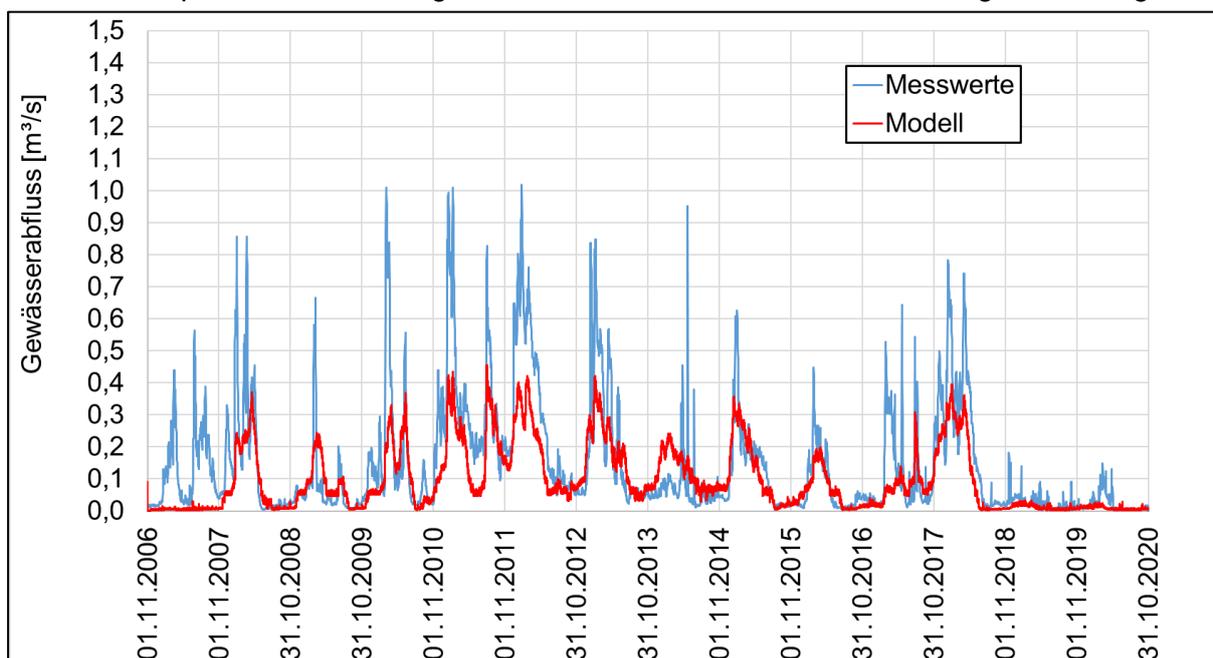


Abb. 3: Gemessene und simulierte Abflüsse eines nahegelegenen Gewässerpegels

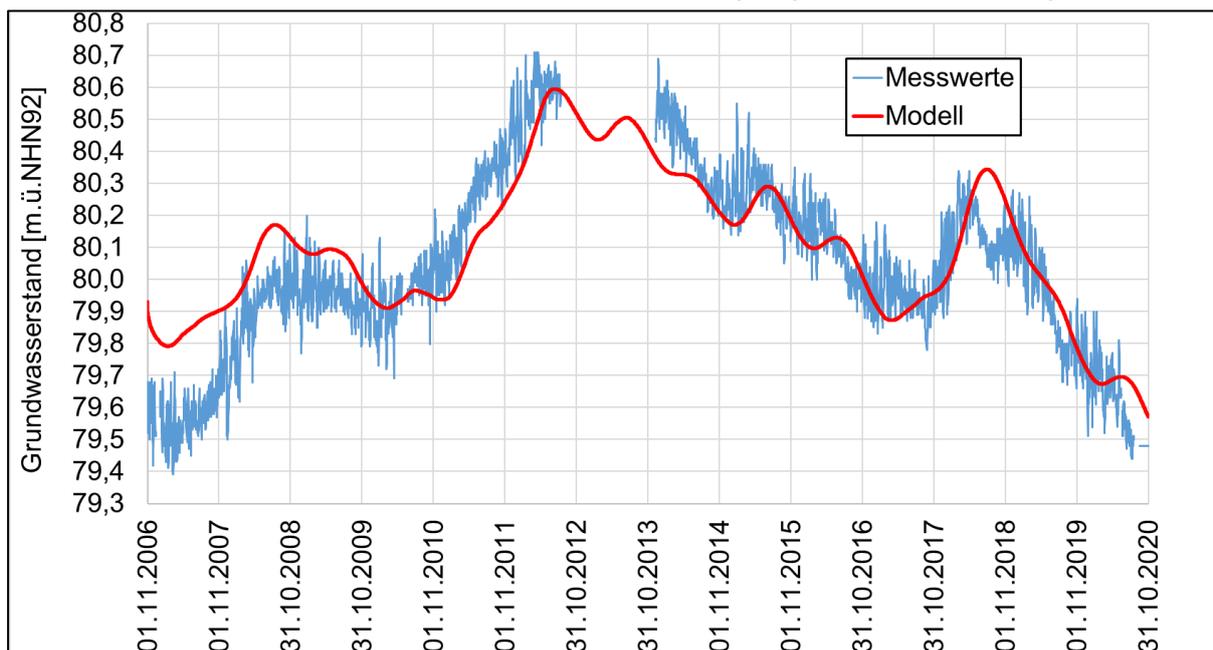


Abb. 4: Gemessene und simulierte Grundwasserstände eine nahe gelegenen Messstelle

3. Projektbezogene Leistungen

3.1 Ermittlung der Wasserbedarfe

Für eine fundierte Speicherbewirtschaftung müssen neben den geplanten Soll-Abgaben ebenfalls die erforderlichen Wasserbedarfe ermittelt werden. Hierfür wurden alle bekannten Entnahmen aus den Oberflächenwässern und dem Grundwasser recherchiert. Ergänzend wurden Stichtagsmessungen durchgeführt und in Kombination mit dem kalibrierten Modell ökologische Mindestabflüsse gemäß der Handlungsempfehlung nach LAWA ermittelt. Zusätzlich wurden durch die Erstellung von Bilanzen der Einzugsgebiete mittels MIKE SHE die erforderlichen Abgaben in die beiden unterstromigen Teileinzugsgebiete nach Osten und Westen plausibilisiert und in Zusammenarbeit mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe abgestimmt.

3.2 Ermittlung des Dargebots

Dem Wasserbedarf gegenüber steht das tatsächlich verfügbare Wasserdargebot. Für die Speicherbewirtschaftung des HKS-Systems ist das verfügbare Dargebot an Oberflächenwasser maßgebend. Durch die sehr starke Anbindung des Seen-Speicher-Systems an das Grundwasser ist allerdings auch die im Einzugsgebiet angesetzte Grundwasserneubildung bzw. das Dargebot an Grundwasser von besonderer Bedeutung. Der unterirdische Grundwasserzufluss nimmt ca. 50% des verfügbaren Gesamtdargebots ein.

Die mit dem Landesmodell ArcEGMO ermittelten Grundwasserneubildungsraten ergeben für das betrachtete Untersuchungsgebiet allerdings einen langjährigen Mittelwert von -4 [mm/Jahr] und sind somit physikalisch nicht verwertbar. Folglich konnten die Grundwasserneubildungsraten von ArcEGMO nicht für eine Grundwassermodellierung verwendet werden. Das integrierte Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE simuliert die Grundwasserneubildung als internen Fluss infolge aller realen Einflussgrößen. Dieser integrierte Ansatz liefert plausible und belastbare Ergebnisse, da hier auch die Reaktionen der Grundwasserstände auf die berechnete Grundwasserneubildung mit instationär kalibriert werden. Die folgende Abbildung 5 zeigt beispielhaft die räumlich hohe Auflösung für langjährige Mittelwerte im 100 m Raster.

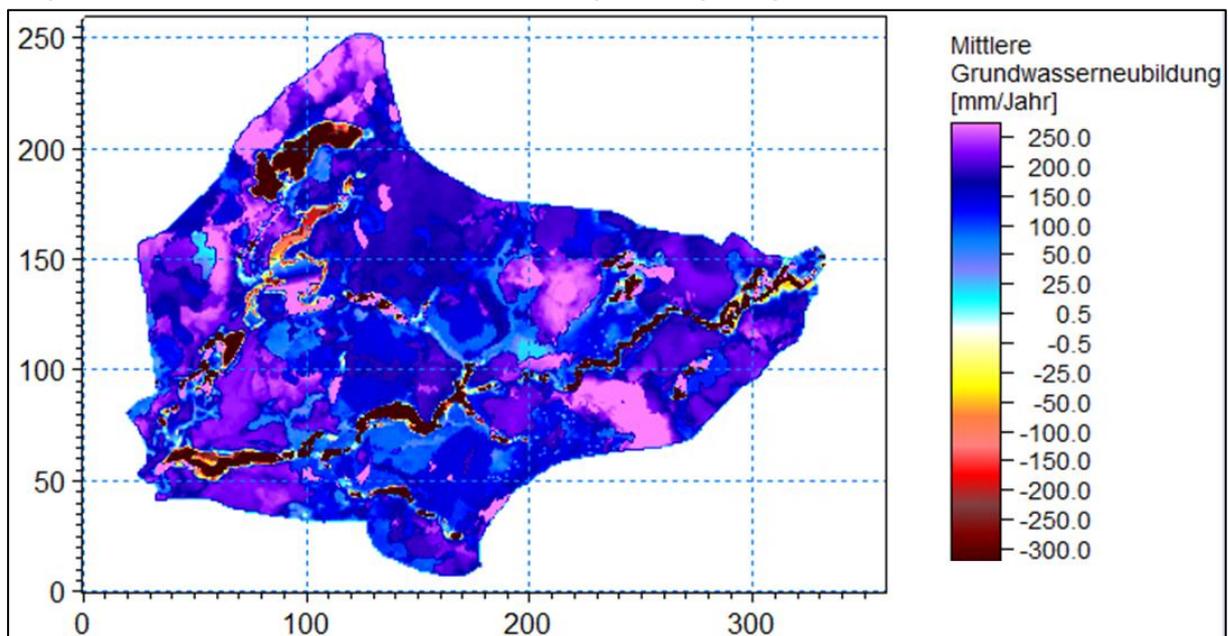


Abb. 5: Räumlich hoch-aufgelöste mittlere Grundwasserneubildungsraten in [mm/Jahr].

Durch die integrierte Kopplung zwischen 1D-Hydraulik Modell und 3D-Grundwassermodell kann für jeden beliebigen Flussabschnitt in jeder 100 x 100 m Rasterzelle und für jeden Zeitschritt der Austausch zwischen Gewässer und Grundwasser ermittelt werden.

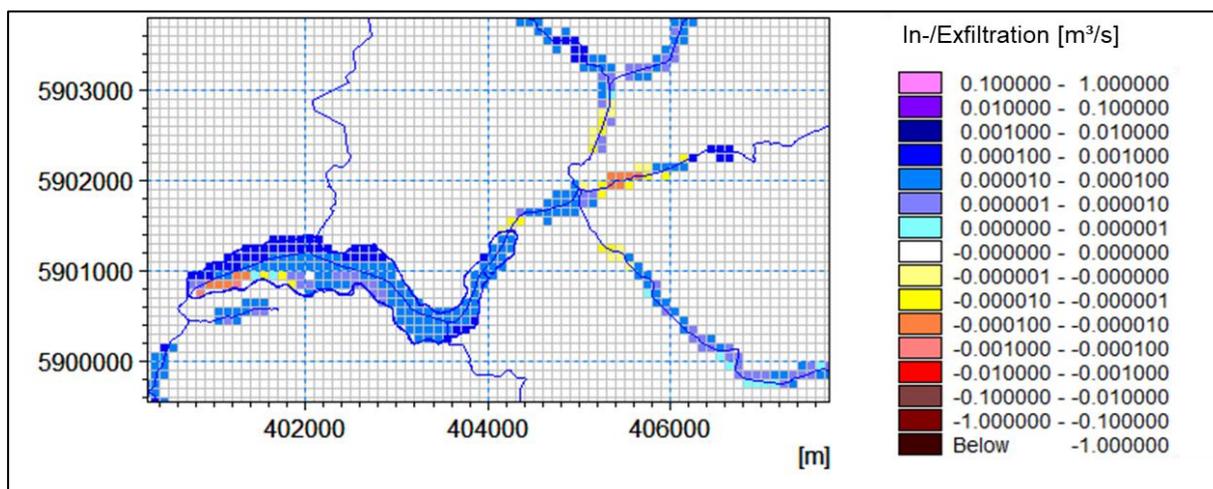


Abb. 6: Ermittlung des Gewässer-Grundwasseraustauschs rasterbasiert für jede einzelne Modellzelle [m^3/s] (gelb-rot = Exfiltration von Gewässer in Grundwasser / blau-lila = Infiltration von Grundwasser in Gewässer).

Somit können nicht nur das Oberflächenwasserdargebot belastbar ermittelt werden, sondern auch geschlossene Bilanzen für die jeweils betrachteten Teileinzugsgebiete erstellt werden. Die Bilanzflüsse werden zuerst je Zeitschritt hochaufgelöst ausgewertet und anschließend zu Monats- bzw. Wasserwirtschaftsjahressummen zusammengefasst. Diese können dann je Komponente aufsummiert werden, um Defizite und Überschüsse zu identifizieren. Hierdurch wird ein vertieftes hydrologisches Verständnis der Gebietsprozesse geschaffen, um die Handlungsempfehlungen entsprechend anpassen zu können.

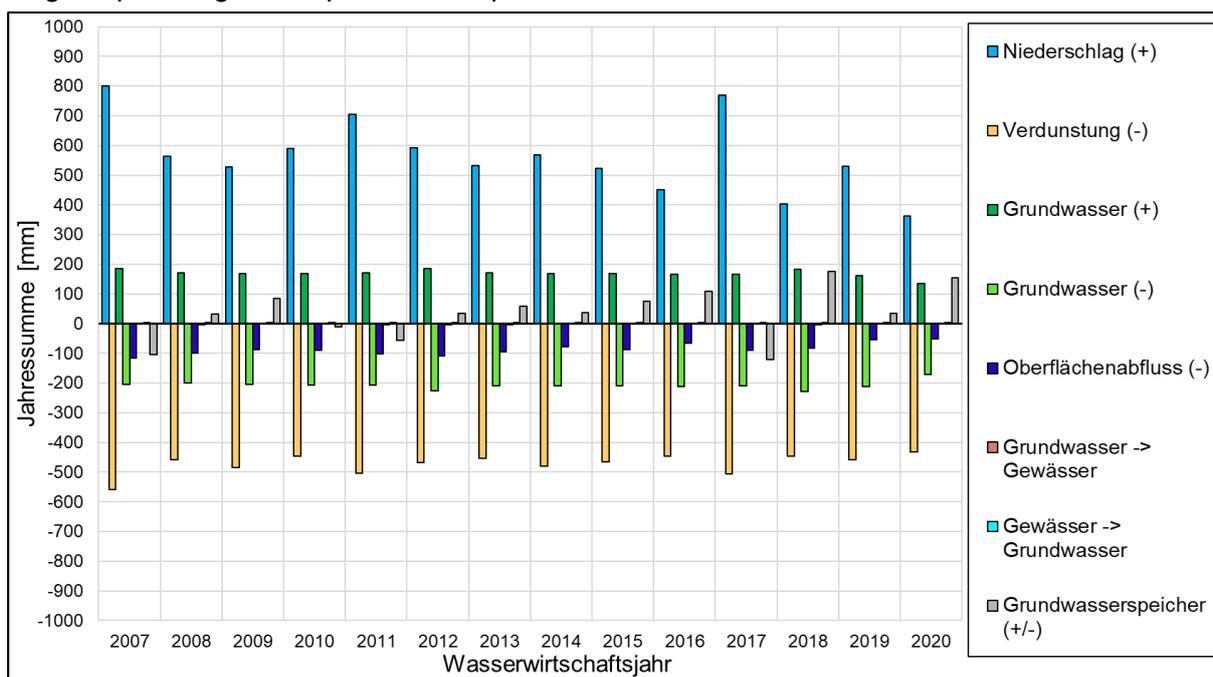


Abb. 7: Summen der drei Bilanzkomponenten für das TEZG Mitte des HKS-Systems in [l/s]

3.3 Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung und Prognoseszenarien

Die modelltechnisch erzeugten Zeitreihen wurden mit Hilfe des Folge-Scheitel-Algorithmus analysiert, um einen Mindestwasserabfluss zu ermitteln, welcher auch in langen Trockenperioden dauerhaft zur Verfügung gestellt werden kann. Die somit geschaffene Datengrundlage stellte die Basis für die finalen Handlungsempfehlungen dar, um eine belastbare und nachhaltige Steuerung des HKS-Seenspeichers zu gewährleisten.

Mit Hilfe dieses Ansatzes konnten die in Tabelle 1 aufgelisteten Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung gegeben werden.

Tab. 1: Empfehlungen zur Speicherbewirtschaftung des HKS-Systems in Abhängigkeit vom aktuellen Wasserstand im Speichersystem.

Wasserstand [mü.NHN92]	Speicherlamelle [cm]	Situation	Gesamtabfluss [l/s]
≥ 68,43	≥ 80	Hochwasser	situationsabhängig
68,28 bis 68,43	65 bis 80	Mittelwasser	220
≤ 68,28	≤ 65	Niedrigwasser	155

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Entwicklung des Speichervolumens in m³ in rot (linke Achse) und die geplanten Abflüsse in m³/s in blau (rechte Achse). Es ist erkennbar, dass die Gesamtabgabe so geregelt wurde, dass der Mindestabfluss immer ermöglicht wird und das Speichersystem nicht leerläuft. In den trockenen Jahren 2018, 2019 und 2020 sinkt das Speichervolumen allerdings auf einen sehr niedrigen Wert, wobei das Mindeststauziel nicht unterschritten wird.

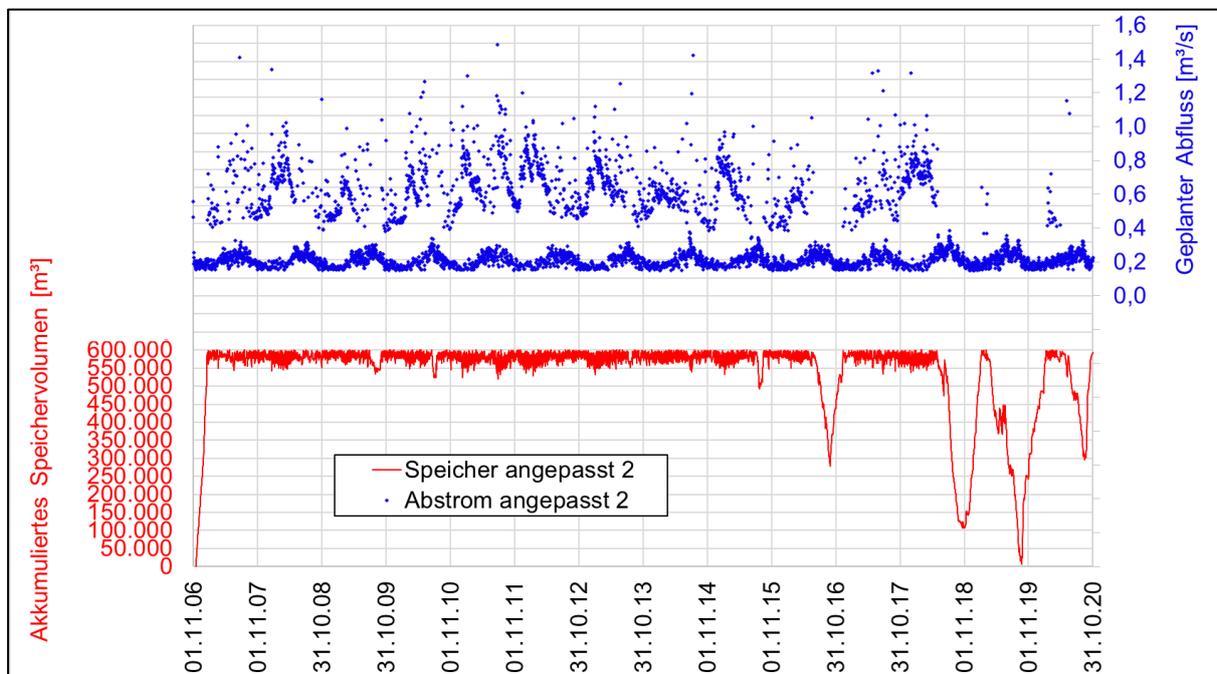


Abb. 8: Optimierte zeitliche Entwicklung des Speichervolumens und möglicher Abfluss für den Niedrigwasserzustand

Da die Wasserabgaben nach Westen in das TEZG Havel von besonderer Bedeutung waren wurden zusätzliche Prognoseszenarien gerechnet, wie sich die Abflüsse und Wasserstände im TEZG Havel ohne Überleitung in das westliche Einzugsgebiet entwickeln würden. In der nachfolgenden Abbildung 7 ist zu erkennen, dass in den Sommerhalbjahren 2018 und 2019 die Niedrigwasserabflüsse auch ohne Überleitung durch die grundwasserbürtigen Zuflüsse ausreichend gestützt werden könnten.

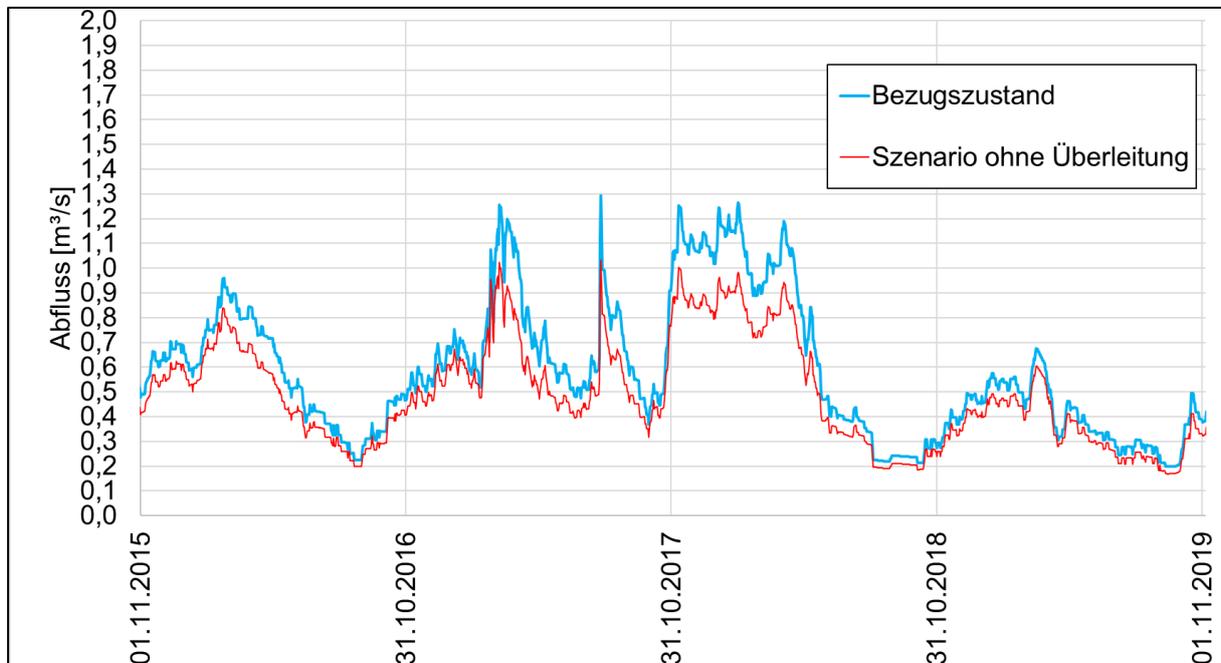


Abb. 9: Berechnete Gewässerabflüsse am Gebietsauslass des westlichen TEZG Havel

4. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Anwendung eines integrierten Wasserhaushaltsmodells wie MIKE SHE konnten die messtechnisch nur schwierig zu erfassenden Größen Grundwasserneubildung und Grundwasser-/Gewässeraustauschrate berechnet werden. Auf Grundlage der verfügbaren Daten und der Modellergebnisse konnten geschlossene Wasserbilanzen für die vier betrachteten Teileinzugsgebiete und das Seenspeichersystem erstellt werden. Der integrierte Ansatz der gekoppelten Modellierung ermöglicht im Vergleich zu den herkömmlichen Wasserhaushaltsmodellierungen nicht nur die Differenzierung innerhalb eines Einzugsgebiets in beliebig hohe zeitliche und räumliche Auflösung, sondern gewährleistet auch eine deutlich höhere Zuverlässigkeit der berechneten Grundwasserneubildung, da Verdunstung und Grundwasserneubildung separat berechnet werden. Alle Kompartimente können in beliebige Teilflächen unterteilt und bilanziert werden. Dieser Modellansatz ermöglicht deutlich belastbarere Werte für die Grundwasserneubildung und das verfügbare Wasserdargebot, sodass die Behörden z.B. dazu befähigt werden, langfristig nachhaltige Entscheidungen bei der Vergabe neuer Wasserrechte zu treffen. Besonders für Einzugsgebiete mit komplexer Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktion, stellt die integrierte Wasserhaushaltsmodellierung für die Behörden und Akteure ein wichtiges Werkzeug da, um in Zukunft belastbare Entscheidungen zu treffen und ein nachhaltiges Wassermanagement zu garantieren. Diese wäre im Einklang mit dem vom DVGW gefor-

dernten modellgestützten Entscheidungssystemen. In der Forderung des DVGW (DVGW Wasser-Impuls: Zukunftsbilder 2030 bis 2100) wird u.a. beschrieben, dass bei der Entwicklung und Umsetzung langfristiger Zukunftskonzepte digitale Lösungen eine erhebliche Unterstützung sein werden. Dabei werden auch Prognose- und Managementmodelle für ganze Einzugsgebiete vorgeschlagen.

Integrierte Wasserhaushaltsmodelle können als dauerhafte Bewirtschaftungsmodelle betrieben werden. Hierfür können die Modelle bspw. alle 5 Jahre fortgeschrieben und verbessert werden. Im Rahmen der kontinuierlichen Fortschreibung kann eine Nachkalibrierung und Erfassung baulicher Veränderungen oder Steuermechanismen erfolgen.

Durch den vollständig diskretisierten Ansatz ist das MIKE SHE Modell ebenfalls in der Lage, auf Basis von Niederschlagsdaten Starkregenszenarien zu rechnen und somit Ergebnisse für maximale Wassertiefen, Überschwemmungsflächen und die Steuerung des Seenspeichers während eines Hochwasserfalls zu liefern.

Literatur

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2005). Zukunftsbilder 2030 bis 2100. In: DVGW Wasser-Impuls (Hg. DVGW).

Graham, D.N. und Butts, M. B. (2005). Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In: Watershed Models (Hg.): Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert. CRC Press. S. 245-272.

Huttner, P., (2022). Untersuchungen zur Wasserbereitstellung für die Einzugsgebiete Ucker und Havel aus dem Seenspeichersystem Hardenbecker Haussee, Boitzenburger Küchenteich und Schumellensee (im Auftrag des LfU Brandenburg, W23).

Kristensen, K., und Jensen, S. (1975). A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. In: Nordic Hydrology 6, S. 170-188.

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung in Deutschland - es entwickelt(e) sich

Uwe Grünewald

Zusammenfassung

In Deutschland bestand noch bis Mitte der 1960er Jahre erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Begriffe „Hydrographie“, „Gewässerkunde“ und „Hydrologie“. Es gab kaum deutschsprachige Lehrbücher. Meist wurde „Hydrologie“ als Hilfswissenschaft des Bauwesens angesehen. Nach 1990 trugen vielfältige Initiativen vor allem von engagierten Fachinstitutionen, Fachwissenschaftlern und Fachverbänden dazu bei, der Hydrologie in Deutschland in Lehre, Forschung und Praxis den heutigen Erfordernissen des Umgangs mit der Ressource Wasser vor allem unter den Herausforderungen von Klima- und Landnutzungswandel gerecht zu werden. Dabei stellen sich erneut viele offene Fragen.

1. (M)Ein Weg vom Wasserbau über die „Hydrographie“, die „Gewässerkunde“ zur „Angewandten Hydrologie“

Gemäß WMO (1974), der DIN 4049 (1979) und der TGL 55035 (1984) ist Hydrologie definiert als „Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche. Sie befasst sich mit den Zusammenhängen und Wechselwirkungen der Erscheinungsformen des Wassers mit umgebenden Medien, seinem Kreislauf, seiner Verteilung auf und unter der Landoberfläche und deren Veränderungen durch anthropogene Beeinflussung.“

Als ich im Frühjahr 1964 nach erfolgreichem Abitur in meiner Geburtsstadt Jena und dem Abschluss einer Berufsausbildung als Wasserbaufacharbeiter in Kleinmachnow am Südrand von Berlin mit dem Gedanken konfrontiert wurde, im Herbst 1964 an der Humboldt Universität in Berlin ein Diplom-Studium der Hydrologie in der Grundstudienrichtung Physik aufzunehmen, kannte ich diese Definitionen nicht.

Im Brockhaus-Konversationslexikon (1923) meiner Eltern fand ich dann - ähnlich klingend - „Hydrographie (grch., d.h. Beschreibung des Wassers), Hydrologie, Gewässerkunde, Teil der physikal. Geographie und im Besonderen der Morphologie der festen Erdrinde, der die Physik des Wassers des Festlands zum Gegenstand hat.“

Bei meiner weiteren Suche stieß ich eher zufällig auf das Buch „Hydrographie“ Schaffernack (1935) und war überrascht über die Vielfalt von Methoden und Verfahren alter und damals neuester Messtechnik, statistischer Auswerteverfahren und insbesondere von ausgefeilten Wasserstands-Vorhersagen an großen Flüssen wie der Donau. Das Buch überzeugte mich durch seine klare Sprache, beeindruckenden Beschreibungen und mathematisch-physikalischer Durchdringung des abgehandelten Stoffes und ich entschied mich, trotz der Unterschiedlichkeit der Fachbenennung („Hydrographie“ versus „Hydrologie“) und trotz meiner Studienzulassung für das Wasserbau-Studium in Dresden für das Studium in Berlin.

Neben fordernden und fördernden Vorlesungen, Übungen, Seminaren, Praktika usw. vor allem in Mathematik, Physik, Chemie und Meteorologie wurden wir Hydrologie-Studenten langsam auch mit den wenigen vorhandenen hydrologischen Fachbüchern vertraut gemacht.

Keller (1962) erwies sich als sehr anschauliches, geographisch beschreibendes Fachbuch, in dem aber auch eine ganze Reihe quantifizierender Beschreibungsansätze vor allem für regionale Wasserhaushaltsgrößen zu finden waren.

Der VEB Verlag für Bauwesen Berlin gab das Buch „Hydrologie - Überirdisches Wasser. Unterirdisches Wasser. Hydrometeorologie. Wasserhaushalt“ Wechmann (1964) heraus. Verglichen mit dem mit Formeln und Verfahren vollgestopften „Handbook of Applied Hydrology“. Chow (1964) las sich das wie eine motivierende, leicht verständliche Einführung. Unmissverständlich wurde uns aber vom Lehrpersonal des damaligen Institutes für Hydrologie an der Humboldt Universität in Berlin und später im Fachstudium an der Technischen Universität Dresden deutlich gemacht, dass wir uns fachwissenschaftlich eher an das englischsprachige Handbook oder die deutschsprachigen „Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft - Herausgeber: Institut für Wasserwirtschaft (IfW), Berlin) halten sollten, weil diese am ehesten den modernen Stand der angewandten Hydrologie widerspiegeln.

Das tat ich dann auch und basierend auf Becker & Glos (1969) konnte ich meine Diplomarbeit und später meine Promotion an der TU Dresden zur Anwendung und Weiterentwicklung systemtheoretischer Verfahren in der Hydrologie abschließen.

Die Ergebnisse beider Arbeiten flossen dann unmittelbar in die in der Dresdner Hydrologie-Schule erarbeiteten ersten deutschsprachigen Lehrbücher Dyck (1976) und Dyck (1978) bzw. in das Einführungsbuch Dyck & Peschke (1989) ein.

Anfang des Jahres 1979 konnte ich meine Habilitation zur stochastischen Simulation des mehrdimensionalen Durchflussprozesses zur Bewirtschaftung und Optimierung komplexer Wasserressourcensysteme erfolgreich verteidigen.

Weitere deutschsprachige Lehrbücher wie Maniak (1987); und Liebscher (1990) und Taschenbücher wie Brettschneider & Lecher u.a. (1993) mit einem großen Teil zu hydrologischen Fragestellungen erschienen in den Folgejahren und sorgten auch dafür, dass sich die Hydrologie als anerkannte Studiengang und Fachwissenschaft in Deutschland etablieren konnte.

2. Zum (Zu)Stand der Hydrologie in Deutschland zu Beginn der 1990er Jahre

Am 09.09.1991 fand im damaligen neu gegründeten „Institut für Hydrologie und Meteorologie (IHM) der Technischen Universität Dresden (TUD)“ ein Kolloquium „Die Herausforderung der Hydrologie in Lehre und Forschung“ zu Ehren des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Dyck statt IHM (1991). In seiner „Festansprache“ formulierte Herr Prof. Plate von der Universität Karlsruhe u.a.:

„Ich sehe in Prof. Dyck zuerst den Wegbereiter für eine wissenschaftliche Hydrologie. Man muss wissen, dass die Hydrologie als Fachgebiet unter einer Schizophrenie leidet: sie soll einerseits eine der klassischen Naturwissenschaften sein, in der es darum geht, das Wirken der Natur in den Prozessen des Wasserkreislaufes zu erforschen, sie soll andererseits aber auch eine Hilfswissenschaft sein für das Bauingenieurwesen, bei der die Hydrologie die Grundlagen für Entscheidungsprozesse, wie z.B. für die Bemessung von Bauwerken, bereitstellen muss. Das führte dazu, dass bis vor wenigen Jahrzehnten die naturwissenschaftlich orientierte Hydrologie die Prozesse des hydrologischen Kreislaufes rein qualitativ und beschreibend erforschte, während Ingenieurhydrologen für Bemessungszwecke empirische Formeln mit recht geringer physikalischer Aussagekraft aus Messungen ableiteten. Wenn man dem Fortschritt der letzten Jahrzehnte in der Hydrologie nachspürt, so findet man, dass diese Zweiteilung der Hydrologie immer mehr aufgehoben wird. Die Hydrologie entwickelt sich zu

einer quantitativen Naturwissenschaft, bei der die natürlichen Prozesse durch die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen sie unterliegen, erfasst werden, während die Ingenieurhydrologie auf immer bessere physikalisch naturwissenschaftliche Grundlagen gestellt wird.“

Noch wesentlich kritischer analysierte Herr Dr. U. De Haar, als damaliger Referatsleiter bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in Bonn im September 1991 anlässlich seines Vortrags „Hydrologie und Forschungsförderung“ zur gleichen Veranstaltung die Stellung, den Stellenwert und die Entwicklung der Hydrologie in der vormaligen Bundesrepublik Deutschland:

„Es ergaben sich so Ende der 1960er Jahre Diskussionen, ob Hydrologie und Wasserwirtschaft überhaupt Fachgebiete der Forschung sind. ... Ist Hydrologie nicht nur eine Verfeinerung der Hydrographie, die beschreibend einen Ist-Zustand dokumentiert und damit Angelegenheit der zuständigen Behörden im Sinne des Beweissicherungsverfahrens ... (und im Sinne der administrativen Dreifaltigkeit: Messen, aufschreiben und abheften) ... ist? ... Die Hydrologie war (in der DFG) kein anerkanntes Fachgebiet

Die Hydrologie wurde erst ernst genommen, als ein Impuls aus dem internationalen Bereich kam. Es war die „Internationale Hydrologischen Dekade“ (IHD) der UNESCO, ... Zum ersten Mal diskutierten Vertreter anderer Fachrichtungen im Senat und im Hauptausschuss der DFG, dass die Hydrologie im Vergleich zu anderen Ländern bei uns völlig rückständig war, und eine Mitarbeit in internationalem Rahmen bedurfte besondere Förderung und Aufbauarbeit.

Dies hatte zur Folge, dass bei der „Senatskommission für Wasserforschung“ ein Sekretariat eingerichtet werden konnte und ein wissenschaftlicher Beirat für das Nationalkomitee für die Internationale Hydrologischen Dekade.“

Nachfolgend beschreibt Herr Dr. de Haar eindrucksvoll, welche Erfolge z.B. zwischen 1965 und 1974 durch ein DFG Schwerpunktprogramm (mit 12,8 Mio. DM) und mit weiteren Schwerpunktprogrammen und DFG Projekten in den 70er und 80er Jahren erzielt werden konnten um dann aber kritisch elf Fragen zu formulieren, von denen ich nur einige kurz anreisen kann:

„1. ... Haben wir uns nach guten Erfolgen seinerzeit nicht zu sehr zufrieden zurückgelehnt? Sind wir möglicherweise auf halbem Wege stehen geblieben? ...

3. ... Wo ist neben diesen Teil der Selbstverwaltung der Wissenschaft - also der DFG - der zwingend erforderliche andere Teil? Also: warum gibt es keinerlei Initiativen aus Fachgesellschaften, kein Interesse zur Mitarbeit? ...

6. Ist unser fachliches Publikationswesen in Ordnung? ...

8. Es werden Hydrologen ausgebildet. Wer befasst sich eigentlich mit dem Berufsbild der Hydrologen? ...

11. Wo sind eigentlich die hochkarätigen Fachtagungen, die auch den Besten den Anreiz geben, persönlich teilzunehmen, ja sogar an der ganzen Tagung und nicht nur an der Sitzung des eigenen Beitrages?“

3. Der Weg der Hydrologie im wieder vereinigten Deutschland

Diese zweifellos aufrüttelnden und mahnenden Worte des m.E. kompetenten DFG Vertreters im September 1991 in Dresden zeigten nachfolgend Wirkung:

Im „Münchner Gesprächskreis“ fand sich Mitte bis Ende der 1990er Jahre Schritt für Schritt eine immer größere Gruppe von Hydrologen, „die sich vorgenommen haben, der deutschen

Hydrologie den Stellenwert in Forschung und Praxis zu verschaffen, der den Erfordernissen des heutigen Umgangs mit Wasser entspricht. ... Die einzelnen Fachbereiche wie beispielsweise Ingenieurhydrologie, naturwissenschaftliche Hydrologie, Hydrogeologie, Gewässerchemie, Limnologie u.a. sind weit auseinander gedriftet. Sie sind teilweise in eigenen Fachgesellschaften oder Fachsektionen benachbarter Wissenschaftsbereiche zusammengeschlossen. Die daraus erkennbaren Folgen wie Abgrenzung, Doppelarbeit, abnehmende Praxisnähe, sprachliches Unverständnis müssen überwunden werden. Darüber hinaus ist zu versuchen, wieder eine „kritische Masse“ von Hydrologen zu aktivieren, die in der Lage sind, dringende Aktionen beim Transfer von Forschungsergebnissen und bei der Forschung selbst zu initiieren und zu bewältigen und auch bei internationalen Programmen (z.B. GEWEX - BALTEX, IGBP-BAHC, IDNDR) mitzuarbeiten“.

So formulierte Prof. H.B. Kleeberg als ein herausragender Aktivist im Mai 1998 einen Aufruf an über 70 „Hydrologie-relevante Institutionen und Personen“ in ganz Deutschland.

Und es zeigten sich erste positive Wirkungen:

Die von der DFG Senatskommission angeregte stärkere Mitwirkung in internationalen Organisationen wie dem IDNDR (Internationalen Dekade für Katastrophenvorsorge) kann als Beispiel dafür stehen.

Das Oder Hochwasser 1997 konnte in interdisziplinärer und länderübergreifender Kooperation mit Polen und Tschechien in seinen Ursachen und Folgen im deutschen IDNDR Nationalkomitee aufgearbeitet und bewertet werden IDNDR (1998).

Das von Dr. de Haar angesprochene Publikationswesen wurde hinterfragt.

Im Jahr 1999 erfolgte die Umbenennung, fachliche Erweiterung und Modernisierung des seit 1957 existierenden Mitteilungsblattes der gewässerkundlichen Dienststellen des Bundes und der Länder in Form der behördenlastigen „Deutschen Gewässerkundlichen Mitteilungen“ (DGM) zur modernen Fachzeitschrift „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ (HyWa). Herausgeber ist zwar nach wie vor die „Bundesanstalt für Gewässerkunde“ (BfG) in Koblenz. Aber inzwischen ist sie national und international renommiert und z.B. im „Web of Science“ gelistet und weist einen Impact Faktor aus.

Zum jährlichen internationalen „Welttag des Wassers“ durfte ich gemeinsam mit anderen Fachkollegen der Limnologie und Hydrogeologie der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU) den neu geschaffenen „Tag der Hydrologie“ unter dem Titel „Wasserbewirtschaftung - einzugsbereichsbezogen und integrativ“ - am 22. und 23. März 2000 in Cottbus ausrichten BTU (2000).

Im Jahr 2002 wurde die „Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW) in der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) als „starkes Netzwerk in einen starken Verbund“ gegründet. Die (nicht ständige) „Senatskommission für Wasserforschung“ der DFG erarbeitete die Denkschrift „Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung“ DFG (2003) und begann sich auch stärker Gedanken zu machen, was passieren müsste, falls sie nicht mehr als eigenständige Senats-Kommission arbeiten könnte.

Am 23.09.2013 erfolgte die Gründung der „Deutschen Hydrologischen Gesellschaft“ (DHG) mit der ersten Geschäftsstelle an der BfG in Koblenz, die in enger Kooperation mit der FgHW und der DWA wesentlich zur Entwicklung von Hydrologie und Wasserbewirtschaftung in

Deutschland aber auch in der Welt beitragen. Hervorzuheben hier das interdisziplinär erarbeitete Einführungswerk Fohrer (2016) sowie deren erfolgreichen Bemühungen um ein eigenständiges Berufsbild für die Hydrologie.

Immer breiter entwickelte sich die interdisziplinäre Arbeit in den wasserrelevanten Fachgebieten Deutschlands. Große BMBF- und DFG-Forschungsverbünde wie GLOWA (z.B. Wechsung et al. (2005)), RIMAX (z.B. Merz et al. (2011)) und KLIMZUG (z.B. Grünewald et al. (2012)) sorgten für vielfältige Vernetzungen und gesellschaftlich bedeutsame Forschungsergebnisse.

Die Vernetzung mit anderen wasserrelevanten Fachgebieten und Institutionen gelang immer besser (Hüttl & Bens (2012)) und ermöglichte auch den notwendigen Blick auf die Entwicklung und nach wie vor bestehenden Defizite der Wasserbewirtschaftung im (über)föderalen Deutschland (Grünewald (2012)). Und was den 11. Kritikpunkt Dr. de Haars von 1991 betrifft, so scheint sich der „Tag der Hydrologie“ über jetzt mehr als zwei Jahrzehnte zu der „hochkarätigen Fachtagung“ entwickelt zu haben, die er so sehr vermisste.

Alles im Lot? Alles bestens mit der Hydrologie und der Wasserbewirtschaftung in Deutschland? Urteilen Sie selbst!

Ich persönlich bin schon der Meinung, dass wir in den letzten drei Jahrzehnten viel erreicht haben bei der immer besseren Unterstützung von Entscheidungsträgern in Wirtschaft, Verwaltungen, Politik, Kommunen usw. bei der Planung, Bemessung, Steuerung und Bewirtschaftung von Wasserressourcensystemen unterschiedlichster Detailliertheit.

ABER:

Spätestens die extremen Hochwasserereignisse der 1990er Jahre an Rhein und Oder sowie an der Elbe in den Jahren 2002 und 2013 sowie deren Aufarbeitung z.B. im „Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge“ DKKV (1993 und 2015) und im RIMAX-Projekt (z.B. Merz et al. (2011)) machten deutlich, woran es bei der Hochwasservorsorge, dem Hochwasserrisikomanagement, der Risikokommunikation im föderalen Deutschland mangelt.

Leider zeigten die Ereignisse im Juli 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen gnadenlos die nach wie vor bestehenden gesamtgesellschaftlichen Defizite auf diesem Gebiet in Deutschland auf. Wir als „deutsche Hydrologengemeinschaft“ sollten selbstkritisch unser offensichtlich mangelhaftes Wirken in Politik, Wirtschaft, Verwaltung und Kommunen aber auch in die Nachbarwissenschaften und in die Bevölkerung hinterfragen.

Trotz umfangreicher Bundes-Gesetzesänderungen, EU-Richtlinien, Änderungen in Landesgesetzen, vielfältigen Fachkonferenzen und Publikationen kam es zu einer katastrophalen Ausprägung des Juli-Hochwasserereignisses im Jahr 2021 in den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Obwohl z.B. im Freistaat Sachsen nach 2002 die Sirenenalarmsysteme vor allem in den engen Nebenflusstälern der Elbe schnellsten wieder eingeführt wurden, hielt man die für das enge, hochwassergefährdete Kerbtal der Ahr für unnötig. Die Einbeziehung großer historischer Hochwässer in die Extremwertstatistik bzw. in die Fixierung von Hochwasserrisikogebieten schien obsolet. Die Gefahr von Brückenverklammerungen mit allen nachfolgenden dramatischen Folgen für Leben, Gesundheit und Eigentum der Anlieger an einem Fluss mit der höchsten Brückendichte Deutschlands wurde vollkommen vernachlässigt (z.B. Bettmann (2022)). Über Jahrzehnte mangelte es in der Region an wirksamen Planungen

und Investitionen zur Verbesserung der Hochwasserflächenvorsorge und -bauvorsorge. Stattdessen erfolgten diese für Prestigeobjekte wie den Nürburgring. Wo bleiben die bisher gewohnten und gelieferten nüchternen und sachlichen diesbezüglichen Analysen des DKKV?

ODER:

Bezüglich der Planung, Entwicklung und Umsetzung großer Industrieansiedlungen in der Region Brandenburg/Berlin zeigte sich am Beispiel TESLA das Unvermögen von Politik und Verwaltung, solche erheblichen Investitionsentscheidungen durch solide Wasserbewirtschaftungsanalysen vorzubereiten und umzusetzen (z.B. Grünwald (2022)).

Warum gelang es den vielen exzellenten wasserorientierten Forschungseinrichtungen der Region Brandenburg und Berlin nicht, jene die Verantwortung tragenden Behörden und Politiker kompetent zu beraten?

ODER:

In einer jüngsten Studie des „Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs (DVGW) und des „Umwelt Forschungszentrum Leipzig“ (UFZ) wird dargelegt, wie Deutschland zumindest bis zum Jahre 2100 kaum Probleme hinsichtlich der Wasserversorgung bei veränderten Klimabedingungen zu erwarten hat (Marx et al. 2022).; und das nach mehreren aufeinanderfolgenden Trockenjahren, mit teilweise extrem abgesunkenen Grundwasserständen und Wasserdefiziten in weiten Bereichen der Land- und Forstwirtschaft, Versorgungsengpässen in der Industrie u.a.. Das klingt für viele Betroffene recht überraschend.

Wäre es jetzt z.B. angebracht, die vielfältig verunsicherten und verzweifelten Vertreter der „Letzten Generation“ zu mindestens hinsichtlich ihrer Befürchtungen und Ängste einer unmittelbar bevorstehenden Wasserkrise in Deutschland zu beruhigen? Oder ist es im Gegensatz dazu angebracht, dass die „deutsche Hydrologengemeinschaft“ und vielleicht auch die neu gegründete ständige Kommission „Erdsystemforschung“ bei der DFG hinterfragen, ob die in Boeing & Marx (2023) verwendeten hydrologischen Modellansätze, welche die veränderte Vegetationsentwicklung unter Klimawandelbedingungen nicht abbilden, überhaupt diesbezüglich belastbare Ergebnisse liefern können?

Erneut stellen sich Fragen über Fragen.

Es bleibt viel zu tun - packen Sie (wir) es an!

Literatur:

Becker, A. Glos, E., 1969. Grundlagen der Systemhydrologie, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Heft 32, Berlin.

Bettmann, T., 2022. Erfahrungen aus dem Hochwasser 2021, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Vortrag auf der Fachtagung Hochwasser „20 Jahre nach der Elbe-Flut – Wo stehen wir jetzt?“ 09. September, Dresden.

Boeing, F., Marx, A., 2023. Klimafolgenstudie für das DVGW-Innovationsprogramm „Zukunftsstrategie Wasser“, (Hrsg.), Abschlussbericht, Januar, Leipzig, Bonn.

Brettschneider, H., Lecher, K. u.a., 1993. Taschenbuch der Wasserwirtschaft, (Hrsg.) Verlag Paul Parey, 7.Auflage, Hamburg und Berlin.

Brockhaus, 1923. Handbuch des Wissens in vier Bänden, Zweiter Band F-K; F.A. Brockhaus, Leipzig.

BTU, 2000. Wasserbewirtschaftung - einzugsgebietsbezogen und integrativ, Tagungsband zum Kolloquium, Brandenburgisch Technische Universität Cottbus, Aktuelle Reihe 4.1 und 42, Cottbus.

- Chow, V.T., 1964. Handbook of applied hydrology, A compendium of water-resources technology, McGraw Hill, New York.
- DFG, 2003. Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung, Denkschrift Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, Weinheim.
- DIN 4049, 1979. Teil 1: Hydrologie; Begriffe quantitativ, Berlin.
- DKKV, 2003. Hochwasservorsorge in Deutschland - Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet, (Hrsg.), Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, DKKV-Schriftenreihe Nr. 29, Bonn.
- DKKV, 2015. Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Risikomanagement in Deutschland, (Hrsg.), Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge, DKKV-Schriftenreihe Nr. 53, Bonn.
- DVGW, 2023. Klimafolgenstudie für das DVGW-Innovationsprogramm „Zukunftsstrategie Wasser - Abschlussbericht, (Hrsg.), Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Januar, www.dvwg.de/zukunft-wasser
- Dyck, S., 1976. Angewandte Hydrologie, Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse (Hrsg.) VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Dyck, S., 1978. Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete (Hrsg.) VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Dyck, S., Peschke, G., 1988. Grundlagen der Hydrologie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Fohrer, N. (2016): Hydrologie, basics (Hrsg.), Haupt Verlag, Bern.
- Grünewald, U. et.al., 2012. Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel, (Hrsg.) E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Grünewald, U., 2012. Regulatorische und institutionelle Ansätze für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung, Abschnitt 5 in (Hüttl/Bens 2012), Heidelberg u.a.
- Grünewald, U., 2021. Trockenheit und Dürren in Europa, Gastbeitrag in: Lebensraum Wasser, Der Wasserblog, lebensraumwasser.com
- Grünewald, U., 2022. Warum der „Weltwassertag“ am 22.03.2022 unter dem Motto „Groundwater: Making the Invisible Visible“ für die Region Berlin-Brandenburg von besonderer Bedeutung sein sollte, Gastbeitrag in: Lebensraum Wasser, Der Wasserblog, lebensraumwasser.com
- Hüttl, R. F., Bens, O., 2012. Georessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel, (Hrsg.) Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland, (acatech STUDIE), Springer Verlag Heidelberg u.a.
- IHM, 1991. Die Herausforderung der Hydrologie in Lehre und Forschung, Tagungsband am Institut für Hydrologie und Meteorologie (IHM) der Technischen Universität Dresden, zum Kolloquium zu Ehren des 65. Geburtstags von Herrn Prof. Dr. Ing. habil. Siegfried Dyck 9.September, Dresden.
- IDNDR, 1998. Ursachen, Verlauf und Folgen des Sommer-Hochwassers 1997 an der Oder sowie Aussagen zu bestehenden Risikopotentialen, (Hrsg.), Eine interdisziplinäre Studie - Langfassung, International Decade for Natural Disaster Reduction, Deutsche IDNDR-Reihe 10 b, Bonn.
- Keller, R., 1962. Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes; Teubner, Leipzig.
- Liebscher, H.J., 1990. Lehrbuch der Hydrologie (Hrsg), Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Maniak, U., 1987. Hydrologie und Wasserwirtschaft- Eine Einführung für Ingenieure, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Marx, A., Boeing, F., Samaniego, L., 2022. Zur Entwicklung des Wasserdargebotes im Kontext des Klimawandels, Ergebnisse des Forschungsprojektes „UFZ-Klimafolgestudie“ für das DVGW Zukunftsprogramm Wasser, Zeitschrift energie/wasser-praxis 08, Bonn.
- Merz, B., Bittner, R., Grünewald, U., Piroth, K., 2011. Management von Hochwasserrisiken, (Hrsg.) E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

- Schaffernack, F., 1960. Hydrographie; Akademische Druck- u. Verlagsanstalt, Graz; Unveränderter Abdruck der 1935 im Verlag von Julius Springer, Wien, erschienen Ausgabe.
- TGL 55035, 1984. Begriffe der Wasserwirtschaft; Hydrologie; Oberflächenwasser quantitativ, Berlin Wechmann, A. (1963): Hydrologie - Überirdisches Wasser - Unterirdisches Wasser - Hydrometeorologie - Wasserhaushalt (Hrsg.) VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Wechsung, F., Becker, A.; Gräfe, P., 2005. Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, (Hrsg.) WeißenseeVerlag, Berlin.
- WMO, 1974. International Glossary of Hydrology: World Meteorology Organisation - No. 385, Genf.

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band 1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

Heft 07.04	Niedrigwassermanagement Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler 172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-47-X	vergriffen
Heft 08.05	Hochwasser-Gefahrenkarten Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-48-8	vergriffen
Heft 03.05	Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03 Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg 185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-924063-57-5	vergriffen
Heft 09.05	Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-67-4	vergriffen
Heft 10.05	Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – von der Theorie zum Anwendungsfall Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam 314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-68-2	42 EUR, CD 29 EUR
Heft 11.05	Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon 200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-80-1	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 12.05	Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg 172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-90-9	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 13.05	Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele Herausgeber: Axel Bronstert Monographie, 2005 148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-91-7	38 EUR, CD 29 EUR

Heft 14.06	<p>Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen Aktualisierte Neuauflage Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 205 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-30-4 ISBN-13: 978-3-939057-30-7</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 15.06	<p>Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch, Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten Band 3 Poster, 280 Seiten ISBN-10: 3 939057-31-2 ISBN-13: 978-3-939057-31-4</p>	<p>beide Vortragsbände zusammen 50 EUR Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR</p>
Heft 16.06	<p>Niederschlag-Abfluss-Modellierung Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst 195 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-55-X ISBN-13: 978-3-939057-55-0</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 17.06	<p>Dezentraler Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg 188 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-56-8 ISBN-13: 978-3-939057-56-7</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 18.06	<p>Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken 232 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-57-6 ISBN-13: 978-3-939057-57-4</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 19.07	<p>Dezentraler Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg 196 Seiten, Format A4 ISBN-13: 978-3-940173-03-4</p>	48 EUR, CD 29 EUR

Heft 20.07	<p>Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007 an der Universität Rostock Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg Band 1 Vorträge, 276 Seiten Band 2 Poster, 17 Seiten ISBN: 978-3-940173-04-1</p>	<p>beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR</p>
Heft 21.07	<p>Verdunstung Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg 252 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-05-8</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 22.07	<p>EU-Hochwasserrichtlinie Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 19./10. November 2007 in Koblenz Herausgeber: Heribert Nacken 126 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-44-7</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 23.08	<p>Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008 an der Leibniz Universität Hannover Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier, Max Billib, Hans-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg 300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-940173-96-6</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 24.08	<p>Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun? Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 256 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-940173-97-3</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 25.09	<p>EU-Hochwasserrichtlinie In drei Schritten zur Umsetzung Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg Herausgeber: Heribert Nacken 126 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941089-53-2</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 26.09	<p>Hydrologische Systeme im Wandel Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009 an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz, Georg Hörmann, Katrin Bieger 196 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941089-54-9</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>

Heft 27.10	<p>Auen und Hochwasser Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010 in Ingolstadt Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg 226 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-08-3</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 28.10	<p>Abflüsse aus extremen Niederschlägen Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 14./15. September 2009 in Trier Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz 245 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-22-9</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 29.10	<p>Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010 an der Technischen Universität Braunschweig Herausgeber: Günter Meon 283Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-941897-49-6</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 30.11	<p>Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz 394 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-941897-79-3</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 31.12	<p>Wasser ohne Grenzen Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Herausgeber: Markus Weiler 413 Seiten, Format A4, mit Poster-CD ISBN: 978-3-942964-38-8</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 32.13	<p>Wasserressourcen im globalen Wandel: Hydrologische Grundlagen - von der Messung zur Anwendung Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013 am 4.-6. April 2013 an der Universität Bern Herausgeber: Rolf Weingartner, Bruno Schädler 199 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-942964-89-0</p>	50 EUR, CD 29 EUR
Heft 33.13	<p>Simulation hydrologischer Systeme – Wie nah kommen wir der Realität? Beiträge zum 3. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 17./18. Septem- ber 2012 in Trier Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz 212 Seiten, Format A4 ISBN: 978-3-944328-02-7</p>	50 EUR, CD 29 EUR

- Heft 34.14 Wasser - Landschaft - Mensch in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 20./21. März 2014 an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka
274 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-944328-61-4 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 35.15 Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement
Prozesse | Methoden | Konzepte
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn
Herausgeber: Mariele Evers, Bernd Diekkrüger
389 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-229-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.35.15
- Heft 36.16 Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?
Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5. und 6. Oktober 2015 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
144 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-341-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.16
- Heft 37.16 Wasserressourcen – Wissen in Flussgebieten vernetzen
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, ausgerichtet von der Hochschule Koblenz und der Bundesanstalt für Gewässerkunde
Herausgeber: Gabriele Wernecke, Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Yvonne Strunck, Lothar Kirschbauer, André Müller
444 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-342-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.37.16
- Heft 38.17 Den Wandel messen – Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um?
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz, Rita Ley, Tobias Schütz
372 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-475-3
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.38.17
- Heft 39.18 M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 an der Technischen Universität Dresden
Herausgeber: Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann
393 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-606-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.39.18
- Heft 40.18 Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren.
Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München.
Herausgeber: Markus Disse, Maria Kaiser
92 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-665-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.40.18

- Heft 41.19 Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruher Institut für Technologie.
Herausgeber: Erwin Zehe, Kirsten Hennrich, Uwe Ehret, Sibylle Hassler, Manuela Nied,
Ulrike Scherer
166 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-821-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.41.19
- Heft 42.20 Hydrologie: Verbindung der Umweltsphären und -disziplinen.
Eingereichte Beiträge zum geplanten Tag der Hydrologie 2020 in Potsdam.
Herausgeber: Axel Bronstert, Björn Felix Guse, Theresa Blume, Fred Fokko Hattermann, Sa-
scha Oswald, Annegret Thieken
96 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-958-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.42.20
- Heft 43.22 Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse – Methoden – Kommunikation.
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2022 in München
Herausgeber: Markus Disse, Ralf Ludwig, Markus Reisenbüchler
100 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-96862-213-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.43.22
- Heft 44.23 Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2023 in Bochum
Herausgeber: Martina Flörke, Christoph Mudersbach
142 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-96862-608-6
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.44.23

Die angegebenen Preise beziehen sich auf die gedruckte Version der Hefte soweit verfügbar. Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten einen Nachlass von 20 %. Die digitale Ausgabe ist unter <http://www.fghw.de> kostenfrei verfügbar.