



**WaXo**  
Wasser-Extremereignisse

BMBF-Fördermaßnahme  
**Wasser-Extremereignisse**

**Abschlusspublikation**

im Rahmen der  
Abschlussveranstaltung  
am 12./13. März 2025

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**FONA**

Nachhaltiges Wassermanagement

Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung



Wasser: N  
SCHUTZ. NUTZUNG. INNOVATION.

Cover:  
Abb. oben: Überflutete Straße (Quelle: AdobeStock | PIXMatex)  
Abb. unten: Ausgetrockneter Stausee (Quelle: iStock | ZU\_09)

## IMPRESSUM

### Herausgeber:

Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV)  
Dr. Benni Thiebes | Melanie Schwarz  
Kaiser-Friedrich-Straße 13 | 53113 Bonn

&

Universität Potsdam  
AG Geographie und Naturrisikoforschung  
Prof. Dr. Annegret Thieken | Dr. Jennifer von Keyserlingk  
Karl-Liebknecht-Str. 24-25 | 14476 Potsdam-Golm

E-Mail: [wax@dkkv.org](mailto:wax@dkkv.org)  
Tel.: +49 (0)228 26 199 570



### Ansprechpartner für die BMBF-Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse“ (WaX):

Beim BMBF:  
Dr. Rainer Müssner  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat 726 „Ressourcen, Kreislaufwirtschaft; Geoforschung“ | 53170 Bonn

Laure Cuny | Dr. Thomas Deppe  
Projektträger Karlsruhe (PTKA), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 | 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
[laure.cuny@kit.edu](mailto:laure.cuny@kit.edu) | [thomas.deppe@kit.edu](mailto:thomas.deppe@kit.edu)

### Redaktion:

Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net der BMBF-Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse“ (WaX). Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren der einzelnen Beiträge.

Die Broschüre ist nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.

Erschienen im März 2025 zur Abschlusskonferenz der BMBF-Fördermaßnahme WaX.  
Graphisches Konzept und Layout: Bassim Hashim | Fa. Satz & Logo | Schumannstr. 1 | 53113 Bonn

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>Die BMBF-Fördermaßnahme WaX: Hintergrund und Ziele</b> .....	<u>04</u>
<b>Untersuchungsstandorte der Verbundprojekte</b> .....	<u>08</u>
<b>Risikomanagement gegensätzlicher hydrologischer Extreme</b>	
<b>DryRivers</b> — Ziele, Anforderungen, Strategien und Werkzeuge für ein zukunftsfähiges Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM) .....	<u>10</u>
<b>KliMaWerk</b> — Nachhaltige Bewirtschaftung des Landschaftswasser- haushaltes zur Erhöhung der Klimaresilienz: Management und Werkzeuge .....	<u>12</u>
<b>Smart-SWS</b> — Smarte multifunktionelle Wasserspeicher – Eine Lösung für saisonale Hochwasserereignisse und zunehmende Dürreperioden .....	<u>14</u>
<b>SpreeWasser:N</b> — Adaption an Wasser-Extremereignisse: Dürremanagement, integrierte Wasserbewirtschaftungskonzepte und verbesserte Wasserspeicherung in der Region Berlin-Brandenburg .....	<u>16</u>
<b>TrinkXtrem</b> — Anpassungsstrategien der öffentlichen Trinkwasserversorgung an Extremereignisse .....	<u>18</u>
<b>Digitale Instrumente für Monitoring, Analyse, Vorhersage und Kommunikation</b>	
<b>InSchuKa4.0</b> — Kombiniertes Infrastruktur- und Umwelt-Schutz durch KI-basierte Kanalnetzbewirtschaftung .....	<u>20</u>
<b>Zwille</b> — Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum .....	<u>22</u>
<b>EXDIMUM</b> — Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden .....	<u>24</u>
<b>Urbane extreme Wasserereignisse</b>	
<b>AVOSS</b> — Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potenziale, Unsicherheiten und Grenzen .....	<u>26</u>
<b>Inno_MAUS</b> — Innovative Instrumente zum Management des urbanen Starkregenrisikos .....	<u>28</u>
<b>FloReST</b> — Urban Flood Resilience–Smart Tools .....	<u>30</u>
<b>AMAREX</b> — Anpassung des Managements von Regenwasser an Extremereignisse .....	<u>32</u>
<b>Projektübergreifende Fragestellungen und Ergebnisse</b> .....	<u>34</u>
<b>Zusammenfassende Erkenntnisse aus WaX</b> .....	<u>42</u>
<b>Weitere Informationen &amp; Links</b> .....	<u>44</u>

## ZWISCHEN ZU VIEL UND ZU WENIG WASSER – HINTERGRUND UND ZIELE DER BMBF-FÖRDERMASSNAHME „WASSER-EXTREMEREIGNISSE“ (WAX)

Das Jahr 2024 wurde von zahlreichen **Starkregen- und Hochwasserereignissen in Deutschland und Europa** geprägt – beginnend mit dem Winterhochwasser in Norddeutschland, über ergebnisreichen Dauerregen im Saarland hin zu einer großflächigen Hochwasserlage mit vereinzelt Starkregenereignissen in Süddeutschland im Juni. Dazu kamen weitere Ereignisse in Österreich, Polen und Ostdeutschland, Südfrankreich und zuletzt Starkregen und verheerende Überschwemmungen im Oktober in Valencia, Spanien. Das Ereignis in Valencia zeigte wieder einmal eindrücklich, dass extreme Regenfälle auch abseits von Gewässern zu lokalen Überflutungen und Sturzfluten führen können, die enorme Schäden an Häusern und Infrastruktur und große Gefahren für Leib und Leben verursachen. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherer (GDV) schätzt die versicherten Schäden für die drei Hochwasserereignisse im ersten Halbjahr 2024 in Deutschland auf 2,4 Milliarden Euro [1]. Die Ge-

samtschäden dürften deutlich höher liegen, da die Versicherungsdichte für Elementargefahren in Deutschland weiterhin nur bei circa 54% liegt und öffentliche Infrastrukturen in der Regel nicht versichert sind.

In den vergangenen Jahren kam es jedoch nicht nur zu Hochwasser und Überschwemmungen, sondern auch zu **langanhaltenden Trockenperioden** mit erheblichen wirtschaftlichen und ökologischen Folgen. Die Dürrejahre 2018 bis 2020 und 2022 resultierten in einem drastischen Wasserdefizit im Boden, fallenden Grundwasserständen, landwirtschaftlichen Ertragsausfällen und zum Teil Einschränkungen bei der Wassernutzung und Schiffbarkeit von Gewässern. Besonders diese indirekten Schäden sind bei Dürre oft hoch. Eine Studie schätzt die direkten und indirekten Schäden der Dürre- und Hitzewellen von 2018 und 2019 in Deutschland auf insgesamt 34,9 Milliarden Euro [2]. Zum Vergleich: Die Flut-

katastrophe von 2021 verursachte Gesamtschäden in Höhe von 40,5 Milliarden Euro, davon 33 Milliarden Euro an direkten Schäden [2]. Durch die feuchteren Jahre 2021, 2023 und 2024 konnte das Wasserdefizit in den Böden zum Teil wieder ausgeglichen werden [3]. Jedoch haben einige Grundwasserspeicher im Osten Deutschlands den Normalzustand nicht wieder erreicht [4].

Das feuchte Jahr 2024 ist laut dem Deutschen Wetterdienst gleichzeitig das wärmste seit Messbeginn 1881 [5]. Expert:innen sind sich einig, dass es einen Zusammenhang zwischen der globalen Erderwärmung und zunehmenden Wasserextremen gibt – mit sowohl zu viel als auch zu wenig Wasser. Eine Attributionsstudie der World Weather Attribution (WWA) [6], die global die zehn tödlichsten extremen Wetterereignisse zwischen 2004 und 2024 untersuchte, unterstreicht: Der **Klimawandel** hat **extreme Wetterereignisse** in den letzten zehn Jahren **verschärft**. Ohne den Klimawandel wäre die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von extremen Wetterereignissen in diesem Ausmaß deutlich geringer gewesen. Aktuelle Projektionen zeigen, dass wir es in Deutschland vermehrt mit feuchten Wintern und heißen, trockenen Sommern zu tun haben werden, während der durchschnittliche Jahresniederschlag weitestgehend unverändert bleibt [7]. Die Niederschläge im Sommer werden vermehrt als **Starkniederschläge** fallen, die von den Böden schlechter aufgenommen werden und daher oberflächlich ab-

fließen [8]. Im Sommer ist bereits heute ein klarer Trend zu einer vermehrten Anzahl an Tagen mit **ausgeprägter Bodentrockenheit** erkennbar [7].

Die zunehmenden Extremereignisse verdeutlichen die Notwendigkeit, **innovative Management- und Anpassungsmaßnahmen für Wasserextreme** zu entwickeln – sowohl für übermäßige als auch für unzureichende Wassermengen. Seit Februar 2022 forschten deshalb im Rahmen der **Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse“ (WaX)** des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zwölf Forschungsverbände an Strategien und Maßnahmen, um die negativen Auswirkungen von Dürreperioden, Starkregen- und Hochwasserereignissen zu verringern. Dafür entwickelten Wissenschaftler:innen, Anwender:innen sowie kommunale Verbände aus insgesamt 81 Partnerinstitutionen Ansätze, die die Auswirkungen von Wasserextremen auf die Gesellschaft und die Umwelt minimieren und neue Perspektiven für die Wasserwirtschaft eröffneten.

### Die Forschungsschwerpunkte lagen dabei auf folgenden Themenfeldern:

» **Digitale Instrumente für Monitoring, Analyse, Vorhersage und Kommunikation:** Die Erfassung, Übermittlung und Verarbeitung von Daten spielt eine Schlüsselrolle für die bessere Vorbereitung auf hydrologische Extremsituationen sowie eine rechtzeitige Warnung und ein abgestimmtes Management im Ereignisfall.



Abb.1 Niedrigwasser an der Elbe, Magdeburger Domfelsen (©U. Satzinger)

### Das Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net

Begleitet wurden die Forschungsverbände vom Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net, das die zentrale Anlaufstelle aller Akteure der Fördermaßnahme WaX darstellte. Das Vorhaben förderte eine intensive Vernetzung und unterstützte eine öffentlichkeitswirksame und zielgruppen-gerechte Darstellung und Kommunikation der Forschungsergebnisse. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden zusätzlich von einem Lenkungskreis begleitet, der als Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis fungierte und den direkten Wissenstransfer und die Verwertung der Forschungsergebnisse unterstützte ([mehr auf S. 34](#)). Durch diesen interaktiven Austausch und eine projektübergreifende Synthese der Forschungsergebnisse wurde ein nachhaltiger und zielgruppen-gerechter Praxistransfer in die Wirtschaft, Praxis, Politik und breite Öffentlichkeit ermöglicht.

**Kontakt:** Dr. Benni Thiebes | Melanie Schwarz – Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge (DKKV)  
Prof. Dr. Annegret Thieken | Dr. Jennifer von Keyserlingk – Universität Potsdam,  
AG Geographie und Naturrisikoforschung  
[wax@dkkv.org](mailto:wax@dkkv.org)

» **Risikomanagement gegensätzlicher hydrologischer Extreme:** Der Umgang mit unterschiedlichen hydrologischen Extremen erfordert die Entwicklung geeigneter Managementstrategien, die sich sowohl bei Wasserüberschuss- als auch bei Wassermangelsituationen als tragfähig erweisen.

» **Urbane extreme Wasserereignisse:** In dicht besiedelten urbanen Räumen sind die Auswirkungen von Extremereignissen besonders groß. Der Umgang mit Sturzfluten und eine funktionsfähige Wasserinfrastruktur auch in Extremsituationen sind daher wichtige Aspekte der öffentlichen Gefahrenvorsorge.

Entwickelt wurden neben innovativen **Monitoring-, Vorhersage- und Kommunikationskonzepten** auch Betriebs- und Risikomanagementstrategien zum Umgang mit gegensätzlichen hydrologischen Extremen. Die Projekte befassten sich mit der Anpassung der städtischen **Wasserinfrastrukturen**, wie der Entwässerungsinfrastruktur und blau-grüner Infrastrukturen, der Erhöhung der hydrologischen und ökologischen **Resilienz von Fließgewässern**, der Sicherung der **Trinkwasserversorgung** sowie der Entwicklung von Managementkonzepten für **Niedrigwasser** einerseits und für **urbane Starkregen- und Überflutungsrisiken** andererseits.

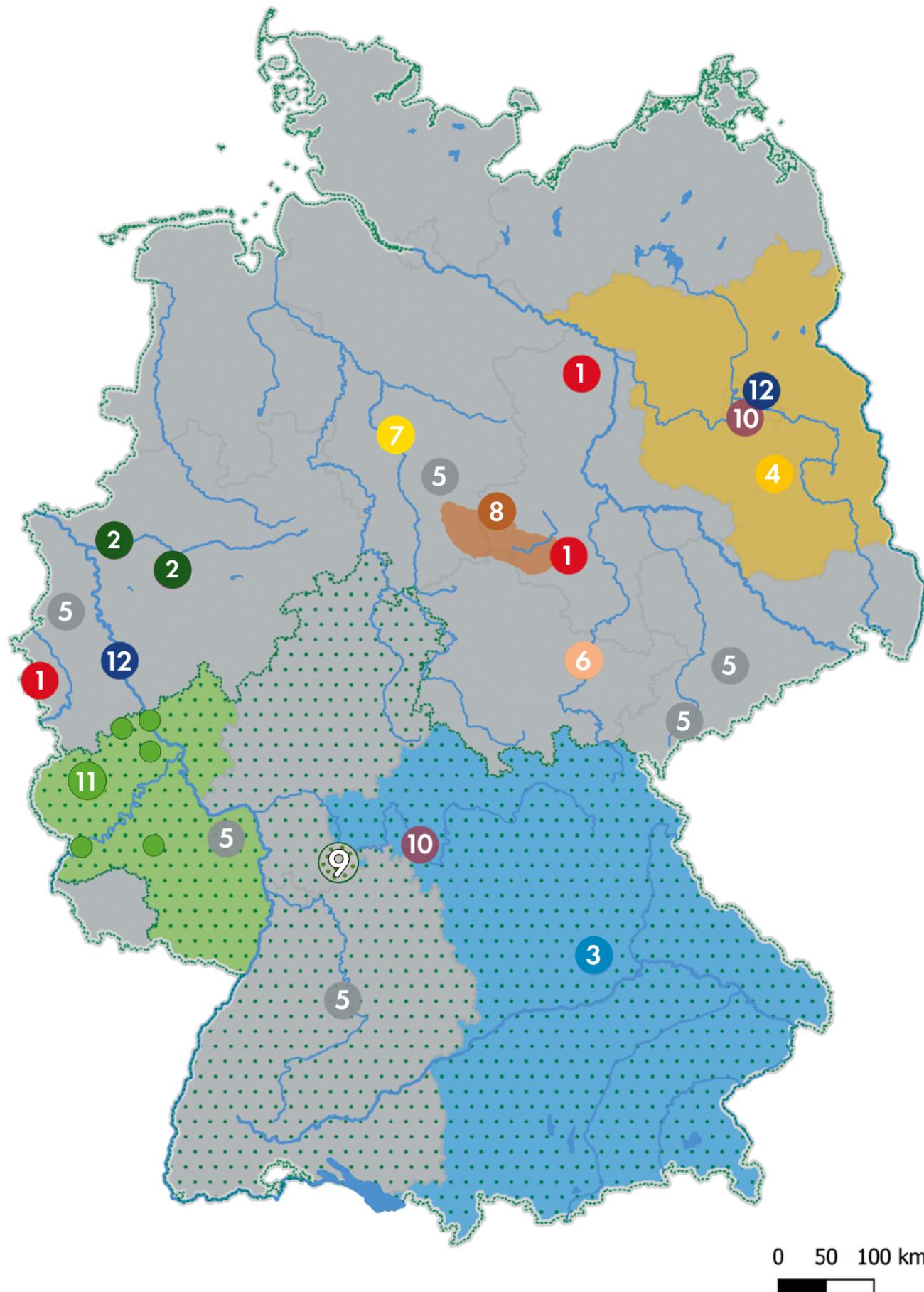
Die Fördermaßnahme WaX ist im Bundesprogramm „Wasser: N – Forschung und Innovation für Nachhaltigkeit“ angesiedelt, das Teil der BMBF-Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ ist.

## LITERATUR:

- [1] GDV, 2024. Naturgefahrenreport 2024. Die Schaden-Chronik der Versicherer. <https://www.gdv.de/resource/blob/183526/d871a7bed27d5c99e20ab387ee393370/naturgefahrenreport-2024-download-data.pdf>.
- [2] Trenczek, J. et al., 2022. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019. Eine ex-post-Analyse. Prognos AG. [https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos\\_KlimawandelfolgenDeutschland\\_Detailuntersuchung%20Hitzesommer%2018\\_19\\_AP2\\_3a\\_.pdf](https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_Detailuntersuchung%20Hitzesommer%2018_19_AP2_3a_.pdf).
- [3] UFZ, 2024. Dürremonitor Deutschland. <https://www.ufz.de/duerremonitor>.
- [4] IGB, 2024. Wasser im Boden, aber nicht im Grundwasser. Pressemitteilung. <https://www.fv-berlin.de/infos-fuer/medien-und-oeffentlichkeit/news/wasser-im-boden-aber-nicht-im-grundwasser>.
- [5] Deutscher Wetterdienst, 2024. Deutschlandwetter im Jahr 2024. [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2024/20241230\\_deutschlandwetter\\_jahr\\_2024\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2024/20241230_deutschlandwetter_jahr_2024_news.html).
- [6] Otto, F. et al., 2024. 10 years of rapidly disentangling drivers of extreme weather disasters. <https://doi.org/10.25561/115431>.
- [7] UBA, 2023. Monitoringbericht. Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023>.
- [8] Bürger, G. et al., 2022. Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 6:262–271. [https://doi.org/10.5675/HyWa\\_2021.6\\_1](https://doi.org/10.5675/HyWa_2021.6_1).



Abb. 2 Winterhochwasser 2024, Rhein in Bonn (©Melanie Schwarz, DKKV)



## Risikomanagement gegensätzlicher hydrologischer Extreme

- 1 DryRivers**  
Ziele, Anforderungen, Strategien und Werkzeuge für ein zukunftsfähiges Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM)  
**Untersuchungsstandort:** Selke, Rur, Elbe
- 2 KliMaWerk**  
Nachhaltige Bewirtschaftung des Landschaftswasserhaushaltes zur Erhöhung der Klimaresilienz: Management und Werkzeuge  
**Untersuchungsstandort:** Lippe
- 3 Smart-SWS**  
Smarte multifunktionelle Wasserspeicher – Eine Lösung für saisonale Hochwasserereignisse und zunehmende Dürreperioden  
**Untersuchungsstandort:** Bayern
- 4 SpreeWasser:N**  
Dürremanagement, integrierte Wasserbewirtschaftungskonzepte und verbesserte Wasserspeicherung in der Region Berlin-Brandenburg  
**Untersuchungsstandort:** Untere Spree
- 5 TrinkXtrem**  
Anpassungsstrategien der öffentlichen Trinkwasserversorgung an Extremereignisse  
**Untersuchungsstandort:** Fernwasserversorgung Elbau-Ostharz, Harzwasserwerke, Talsperrrenverwaltung Sachsen, Rheinische-Westfälische Wasserwerksgesellschaft, Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz, Zweckverband Landeswasserversorgung

## Digitale Instrumente für Monitoring, Analyse, Vorhersage und Kommunikation

- 6 InSchuKa4.0**  
Kombinierter Infrastruktur- und Umweltschutz durch KI-basierte Kanalnetzbewirtschaftung  
**Untersuchungsstandort:** Jena
- 7 ZwiLE**  
Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum  
**Untersuchungsstandort:** Hannover
- 8 EXDIMUM**  
Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden  
**Untersuchungsstandort:** Harz

## Urbane extreme Wasserereignisse

- 9 AVOSS**  
Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potenziale, Unsicherheiten und Grenzen  
**Untersuchungsstandort:** Multiskalen: Deutschland; Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz & Hessen; ausgewählte Pilotgemeinden
- 10 Inno\_MAUS**  
Innovative Instrumente zum Management des urbanen Starkregenrisikos  
**Untersuchungsstandort:** Berlin, Würzburg
- 11 FloReST**  
Urban Flood Resilience–SmartTools  
**Untersuchungsstandort:** Altenahr, Herrstein/Rhauen, Linz am Rhein, Mendig, Tier
- 12 AMAREX**  
Anpassung des Managements von Regenwasser an Extremereignisse  
**Untersuchungsstandort:** Köln, Berlin

## ZIELE, ANFORDERUNGEN, STRATEGIEN UND WERKZEUGE FÜR EIN ZUKUNFTSFÄHIGES NIEDRIGWASSERRISIKOMANAGEMENT (NWRM)

Das Projekt DryRivers entwickelte ein Instrument für eine holistische Niedrigwasserrisikoanalyse, das Behörden bei der Umsetzung eines transparenten, objektiven und effektiven Niedrigwasserrisikomanagements (NWRM) für Fließgewässer unterstützt.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.07.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr.-Ing. Daniel Bachmann, Hochschule Magdeburg-Stendal <a href="mailto:daniel.bachmann@h2.de">daniel.bachmann@h2.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://wax-dryrivers.h2.de">https://wax-dryrivers.h2.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW)</li> <li>» RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie (STO)</li> <li>» umweltbüro essen Bolle und Partner GbR</li> <li>» LimnoPlan – Fisch- und Gewässerökologie</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Zunehmend trockene Sommer führen zu hydrologischen Niedrigwasserrekorden in vielen Fließgewässern, die mit umfangreichen Schäden für verschiedene Akteure einhergehen. Bei der Entwicklung des NWRM wurden daher die verschiedenen Aspekte von Niedrigwasser abgedeckt: von der Entstehung im Einzugsgebiet über die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Ausprägung im Fließgewässer bis hin zu den Folgen. Weiterhin wurden wasserwirtschaftliche, sozioökonomische und ökologische Aspekte in einem interdisziplinären Ansatz gleichermaßen berücksichtigt, um so verschiedene Maßnahmen zur Minderung der unterschiedlichen Schäden von Niedrigwasser zu entwickeln und anhand der im Projekt untersuchten Pilotgebiete an der Rur, der Selke und der Elbe zu testen.

### Zentrale Ergebnisse

Der Kern des Niedrigwasserrisikomanagements liegt in der **Niedrigwasserrisikoanalyse (NWRA)**, die das entsprechende Risiko für ein Fließgewässer bewertet. Zur bestmöglichen Nachbildung der Entstehung und der Folgen von Niedrigwasserereignissen basiert die NWRA auf der **Modellierung langjähriger Zeitreihen**. Sie umfasst verschiedene Schritte: In der **meteorologischen Analyse** werden langjährige Wetterdaten mithilfe eines Wetter-Generators erzeugt. Diese fließen in die **hydrologische Analyse** ein, wo sie in langjährige Abflusszeitreihen umgewandelt werden.

In der **hydrodynamischen Analyse** werden daraus Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Wassertemperaturen berechnet. Diese Langfrist-Berechnung basiert auf einem 1D-Fließgewässermodell, das bidirektional mit einem 2D-Grundwassermodell gekoppelt ist, um Austauschprozesse zwischen den modellierten Wasserkörpern zu berücksichtigen. Wassertemperaturen entlang des Gewässers werden durch ein 1D-Temperaturmodell ermittelt.

Die Ergebnisse der hydrodynamischen Analyse bilden die Grundlage für die **Konsequenzenanalyse**. **Sozio-ökonomische Konsequenzen** werden mithilfe von Schadensmodellen analysiert, z. B. durch Berechnung der ausfallenden Ladekapazitäten der Schifffahrt bei Niedrigwasser und deren monetären Bewertung mittels Substitutionskosten. Im Bereich der **ökologischen Konsequenzen** werden die Konsequenzen für Fische und Makrozoobenthos (MZB) beurteilt. Letzteres erfolgt über verschiedene Indizes, die auf einer Korrelation mit den errechneten Wassertemperaturen basieren. Der Zustand der Fische wird durch eine umfassende Bewertungsmatrix beurteilt, die Faktoren wie Lebensraumverlust, Laichzeit und Lethaltemperaturen berücksichtigt. Diese Analysen ergeben einen Score, der die ökologischen Konsequenzen zusammenfasst. Der finale Risikowert ergibt sich aus der Summe der einzelnen Konsequenzkategorien über die langjährigen Zeitreihen hinweg, dividiert durch die modellierten Jahre.

In einem Risikomanagement folgt nach der Risikoanalyse die Risikoakzeptanzprüfung. Wird das Risiko als inakzeptabel eingestuft, müssen Minderungsmaßnahmen entwickelt und bewertet werden. Mit Hilfe der Risikoanalyse kann die Effektivität einer Maßnahme quantifiziert und bewertet werden. Akzeptierte Risiken erfordern einen Umgang mit dem Restrisiko. Kommunikation und die Einbindung aller Akteure sind in allen Phasen des Risikomanagements entscheidend. Zur Identifikation der beteiligten Akteure können bestehende Netzwerke mit z. B. NetMaps identifiziert werden.

Die beschriebenen Analysen sind weitestgehend in der Software Low-Flow Decision Support (LoFloDes) und den zugehörigen QGIS-Plugins sowie in Zusatzskripten implementiert. Die Software ist kostenfrei verfügbar und kann unter <https://github.com/dabachma/LoFloDes> bezogen werden.

### Perspektiven für die Praxis

Die Ergebnisse des Projekts bieten vielfältige Perspektiven für die Praxis. Behörden oder andere Akteure können die entwickelten Instrumente nutzen, um Risiken durch Niedrigwasser objektiv zu bewerten und effektive Maßnahmen zur Risikominderung zu planen. Durch die Modellierung der

Maßnahmen können deren Auswirkungen vorab simuliert und optimal abgestimmt werden.

Aufgrund der Interdisziplinarität ist die Anwendung relevant für betroffene Wirtschaftssektoren, wobei durch präzisere Risikoabschätzungen und resultierenden Anpassungen wirtschaftliche Verluste minimiert werden können. So kann etwa für Redereien oder Wasserkraftbetreiber eine Risikoanalyse dazu dienen, die monetären Schäden zu quantifizieren und entsprechend einzukalkulieren. Darüber hinaus kann der Ansatz etwa für touristische Anbieter oder die kommerzielle Fischteichwirtschaft genutzt werden, um frühzeitig auf das Risiko zu reagieren und entsprechende Anpassungsstrategien zur Risikominderung zu entwickeln. Außerdem profitieren Naturschutzorganisationen von der Bewertung ökologischer Konsequenzen, z. B. für Fische und Makrozoobenthos, wodurch nachhaltige Managementstrategien gefördert werden.

Die praxisnahe Kommunikation und Einbindung aller Akteure stellt sicher, dass die Ergebnisse auch langfristig anwendbar bleiben und zur Verbesserung des Niedrigwasserrisikomanagements beitragen.

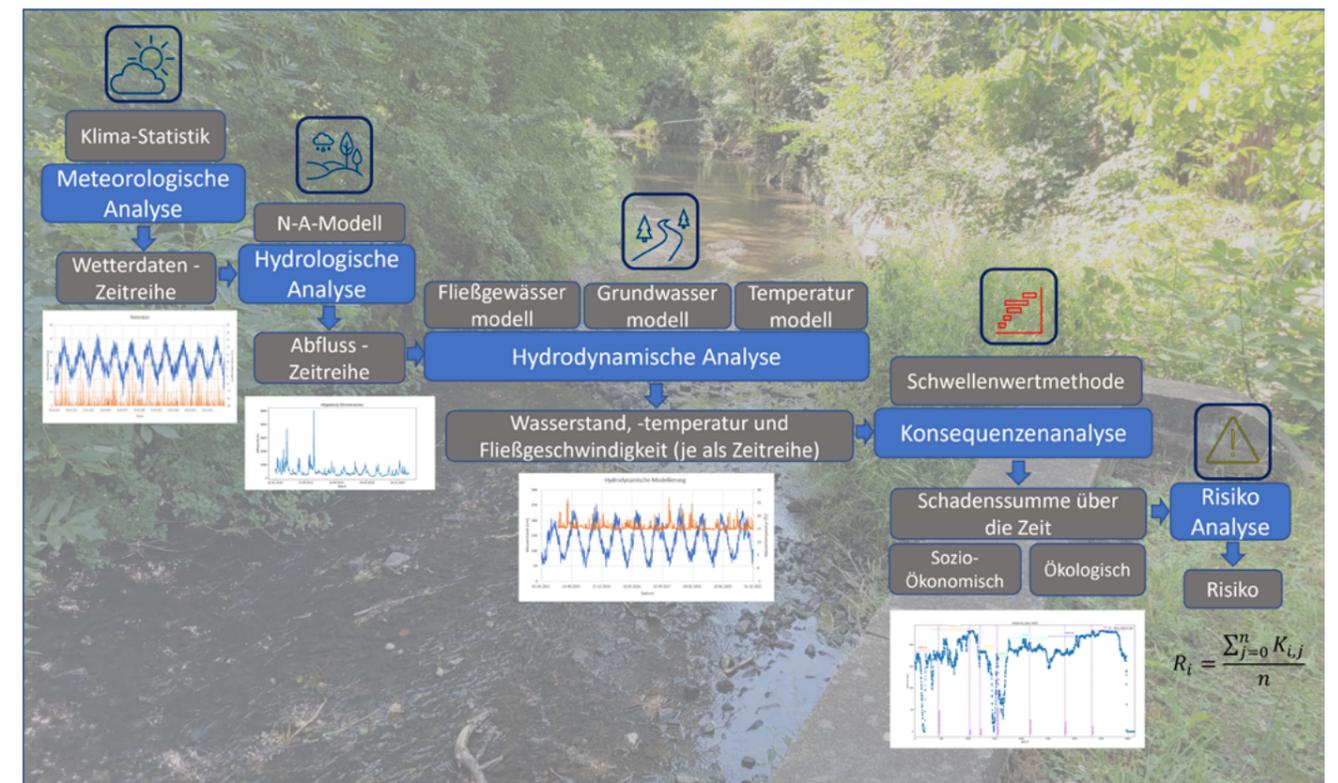


Abb.3 Schema des holistischen Ansatzes zur Niedrigwasserrisikoanalyse (©DryRivers)

## NACHHALTIGE BEWIRTSCHAFTUNG DES LANDSCHAFTSWASSERHAUSHALTES ZUR ERHÖHUNG DER KLIMARESILIENZ: MANAGEMENT UND WERKZEUGE

Das Projekt KliMaWerk hat gezeigt, wie ein an die klimawandelbedingten Extremereignisse angepasster Landschaftswasserhaushalt aussehen kann. Dazu wurden die hydrologischen und ökologischen Wirkungen von resilienzsteigernden Maßnahmen auf Gewässer und Landschaft untersucht.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 30.04.2025
<b>Koordinator:</b>	Dr. rer. nat. Mario Sommerhäuser, Lippeverband <a href="mailto:sommerhaeuser.mario@eglv.de">sommerhaeuser.mario@eglv.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="http://klimawerk-projekt.de">http://klimawerk-projekt.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Universität Duisburg Essen, Abteilung Aquatische Ökologie</li> <li>» Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft</li> <li>» Planungsbüro Koenzen</li> <li>» Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH</li> <li>» delta-h Ingenieurgesellschaft mbH</li> <li>» Ecologic Institut gGmbH</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Aufgrund des Klimawandels ist vermehrt mit Extremperioden zu rechnen, die sowohl durch langanhaltende Trockenheit als auch durch intensive Niederschläge gekennzeichnet sein können. Dies stellt die Wasserwirtschaft und Wassernutzer vor große Herausforderungen. Ziel von KliMaWerk war es, aufzuzeigen, wie Gewässer und Landschaftswasserhaushalt an die Folgen des Klimawandels angepasst werden können, um die Resilienz von hydrologischen und ökologischen Funktionen zu stärken und wichtige Ökosystemleistungen zu sichern. Dabei lag der Fokus auf beiden Extremen: langanhaltende Trockenheit sowie Starkregen und Perioden mit hohen Niederschlägen.

Dafür wurden die Wirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt und die Gewässer eines nachhaltigen versus eines konventionellen Maßnahmenzenarios, bestehend aus einer Kombination von urbanen und ländlichen Anpassungsmaßnahmen, im Einzugsgebiet der Lippe in Nordrhein-Westfalen für die Klimaszenarien RCP2.6 und 8.5 ermittelt. Die Maßnahmen wurden unter Beteiligung von lokalen Interessensvertretungen aus verschiedenen Sektoren (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt- und Naturschutz sowie Wasserwirtschaft) zusammengestellt. Zur Modellierung der hydrologischen Wirkungen der Maßnahmenzenarios wurden das Niederschlags-/Abfluss-Modell NASIM, das Grundwassermodell SPRING und das ökohydro-

logische Modell SWAT+ genutzt. Die Simulationsergebnisse wurden zusammen mit erhobenen Daten – u. a. hydromorphologische, physiko-chemische und biologische – aus Freilanduntersuchungen zur Bewertung der Maßnahmenwirkungen auf Fließgewässerökosysteme herangezogen.

Die aus den Ergebnissen erstellten Produkte sind: **gekoppelte Modelle** zur Modellierung des Maßnahmeninflusses auf den Landschaftswasserhaushalt, ein **Werkzeugkasten mit Steckbriefen zu Anpassungsmaßnahmen** sowie **Empfehlungen** für die **Entwicklung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushaltes**.

### Zentrale Ergebnisse

Eine Entsiegelung im urbanen Raum durch die Etablierung von Gründächern und eine gesteigerte Infiltration führten im Modell zu einer leicht höheren Evapotranspiration und Grundwasserneubildung. Der Direktabfluss sank hingegen leicht. Hierdurch kann eine höhere Kühlwirkung an Hitzetagen erzielt und das Überflutungsrisiko gedämpft werden. Anpassungsmaßnahmen, wie die Landnutzungsänderung von Nadel- zu Laubwald oder der Anbau von trockenresistenteren Feldfrüchten, ließen im Modell den Anteil der Wasserbilanzkomponente Evapotranspiration am Gesamtniederschlag im Einzugsgebiet der Lippe sinken. Dementsprechend stand mehr Wasser in der Landschaft zur Verfügung: Grundwasserneubildung und Direktabfluss stiegen

ganzjährig. Eine **erhöhte Grundwasserneubildung** sowohl im Winter- als auch im Sommerhalbjahr ist im Hinblick auf lange Trockenperioden positiv zu bewerten. **Stabile Grundwasserstände** ermöglichen eine gesicherte Wasserversorgung und die Aufrechterhaltung des Zustroms in grundwassergeprägte Fließgewässer. Dies verhindert das Austrocknen ganzjährig wasserführender Gewässer auch in extremen Trockenperioden, erhält die aquatischen Lebensräume und senkt die **Wassertemperatur**. Die Etablierung von Ufergehölzen hat ein noch höheres Potenzial auch in nicht grundwasserbeeinflussten Fließgewässern die Wassertemperatur, die einen eindeutigen Einfluss auf das Makrozoobenthos in den Untersuchungen hatte, zu mindern. Ein **gesteigerter Direktabfluss** kann – losgelöst von weiteren Maßnahmen – einerseits zu höheren Abflussspitzen bei Hochwasser führen, andererseits wird der Niedrigwasserabfluss im Sommer gestützt. Entscheidend sind daher **ziel- und nutzungsgerechte Maßnahmenkombinationen**: Durch eine Kombination aufeinander abgestimmter Maßnahmen für das jeweilige Einzugsgebiet kann z. B. ein erhöhter Direktabfluss durch größere Retentionsflächen oder gesteuerte Entwässerungsgräben abgefangen werden. Der entwickelte Werkzeugkasten unterstützt die Auswahl der richtigen Maßnahmenkombination bei der praktischen Planung. Nur das nachhaltige Maßnahmenzenario mit einer großflächigen Um-

setzung einer Vielzahl von urbanen und ruralen Anpassungsmaßnahmen führte in den Modellen zu sichtbaren Wirkungen im Landschaftswasserhaushalt und den Gewässern. Dies ermöglicht eine Steigerung der Resilienz gegenüber zunehmenden hydrologischen Extremen des Klimawandels, wodurch Ökosystemleistungen, wie z. B. die Wasserversorgung in Dürre Jahren, gesichert und aquatische Ökosysteme geschützt werden.

### Perspektiven für die Praxis

Das Projekt KliMaWerk macht deutlich, dass die Umsetzung vielfältiger Anpassungsmaßnahmen im großen Maßstab nötig ist, um einen extremwetterresilienten Wasserhaushalt herbeizuführen und Wassernutzungskonflikten entgegenzuwirken. Für die praktische Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Entwicklung eines nachhaltigen Landschaftswasserhaushaltes gibt das Projekt konkrete Handlungsempfehlungen und entwickelte einen Werkzeugkasten mit Steckbriefen zu Einzelmaßnahmen und deren Wirkungen sowie einem Entscheidungsunterstützungssystem und Hinweisen zum Überwinden von Umsetzungshindernissen. Die Produkte richten sich an die Wasserwirtschaft, Land- und Wassernutzer sowie entsprechende Verwaltungen, insbesondere an Gewässer- und Landschaftsplaner:innen, die sich mit der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen beschäftigen.



Abb.4 Modellerte Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen auf den Wasserhaushalt im Lippeinzugsgebiet. (©Grantz et al., 2025)

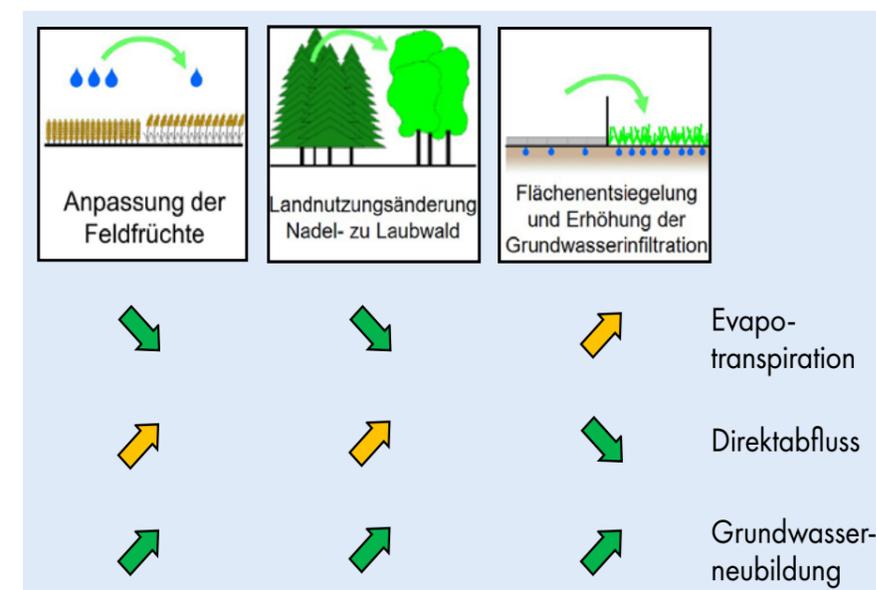


Abb.5 Renaturiertes sandgeprägtes Nebengewässer der Lippe (Rapphofs Mühlenbach) mit Ufervegetation und aufgeweitetem Bachbett. (©EGLV, Nicolai Bätz)

## SMARTE MULTIFUNKTIONELLE WASSERSPEICHER – EINE LÖSUNG FÜR SAISONALE HOCHWASSEREREIGNISSE UND ZUNEHMENDE DÜRREPERIODEN

Im Projekt Smart-SWS wird Hochwasserschutz mit Dürrevorsorge gekoppelt, indem überschüssiges Oberflächenwasser in Grundwasserleiter infiltriert wird. Durch eine zusätzliche Aufbereitung des Wassers wird so eine unterirdische Speicherung in hoher Qualität und Quantität ermöglicht.

<b>Laufzeit:</b>	01.03.2022 - 28.02.2026
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr. Thomas Baumann, Technische Universität München – Lehrstuhl für Hydrogeologie <a href="mailto:tbaumann@tum.de">tbaumann@tum.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://www.smart-sws.de">https://www.smart-sws.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Technische Hochschule Deggendorf,</li> <li>Institut für Angewandte Informatik Technologie Campus Freyung</li> <li>» SPEKTER GmbH</li> <li>» AQUASOIL Ingenieure &amp; Geologen GmbH</li> <li>» Prof. Dr. jur. Willy Spannowsky</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Klimaprognosen deuten auf eine Zunahme von extremen hydrologischen Ereignissen wie Dürren und Überschwemmungen hin, bei denen die Wasseraufnahmekapazität des Bodens bei starken Regenfällen schnell überschritten wird. Das überschüssige Wasser fließt dann oberflächlich ab, verursacht Überschwemmungen und steht nicht mehr für die Grundwasserneubildung zur Verfügung. Dadurch wird der Wasserhaushalt der Landschaft auf lokaler und regionaler Ebene gestört. Maßnahmen zur künstlichen Grundwasseranreicherung können diesem Phänomen entgegenwirken, insbesondere dann, wenn die Anreicherung mit Wasser erfolgt, das sonst durch den schnellen Abfluss aus der Region verloren gegangen wäre. Im Projekt Smart-SWS werden Konzepte zur dezentralen Wasserspeicherung in bestehenden Aquiferen entwickelt und technisch erprobt. Die unterirdische Speicherung hat dabei den Vorteil, nicht mit anderen Landnutzungen in Konflikt zu geraten und keiner Verdunstung ausgesetzt zu sein.

### Zentrale Ergebnisse

Die **grundsätzliche Standorteignung** von Smart-SWS Anlagen in Bayern wurde anhand von Eignungskriterien für den Aquifer, die oberflächliche Nutzung und die Wasserquelle überprüft. Eine daraus entwickelte **Multi-Kriterien Analyse**

(Augustin & Baumann, 2024) zeigte, dass 35% der Flächen in Schwaben grundsätzlich geeignet sind, und erlaubt die Übertragbarkeit auf andere Regionen. Eine mögliche Quelle zur Grundwasseranreicherung sind **Hochwasserspitzen** in kleineren Flüssen. Zur zeitlich hoch aufgelösten Überwachung der **Flusswasserqualität und -quantität** wurden Open-Hardware Sensorboxen entwickelt, die seit Frühjahr 2023 an zwei Standorten im Allgäu im Einsatz sind. Während tägliche und saisonale Schwankungen der Wasserqualität und -quantität mit dem Einzugsgebiet in Verbindung gebracht werden können, zeigen Messungen während Hochwasser oft eine starke Verdünnung.

Durch das Monitoring wurde die Wichtigkeit einer **risiko-basierten Einzugsgebietsanalyse** deutlich. Um die Grundwasserqualität bei einer Anreicherung nicht zu verschlechtern, spielt das Gefährdungspotential des Hochwassers und die entsprechende Auslegung der Aufbereitungsanlage eine entscheidende Rolle. Ein hoher Anteil feiner Partikel kann dabei das technische Design maßgeblich bestimmen: einerseits aufgrund der Gefahr des Zusetzens und damit einhergehend der Abnahme der Filtereffizienz bei der Wasserinfiltration und andererseits aufgrund des hohen Anteils an Schadstofftransport an Partikeln. Ein geeignetes technisches Konzept eines Wasserspeicher- und Monitoringsystems wurde anhand

einer **Pilotanlage in der Hallertau** (Bayern) entwickelt. Während der rechtliche Rahmen für künstliche Grundwasseranreicherung in Deutschland noch viele Lücken aufweist, wird die Umsetzbarkeit anhand dieser Pilotanlage demonstriert. Hier wird oberflächlich abfließender Starkregen in einem **Rückhaltebecken gesammelt, aufbereitet** und über einen Infiltrationsbrunnen in den anstehenden Grundwasserleiter **infiltriert**. Ein automatisiertes Regelungssystem stellt ein minimales Risiko für die primären Schutzgüter Grundwasser und Infrastruktur sicher. An einem zweiten Standort wurde ein **naturräumliches Speicherkonzept** basierend auf diesen Ergebnissen weiterentwickelt. Die Grundlagen zur detaillierten Planung wurden dort maßgebend von einer hydrogeologischen Modellierung des geplanten Speichers, welcher an ein bestehendes Hochwasserrückhaltebecken gekoppelt werden soll, geliefert.

Die Auswirkungen von Speichersystemen wie Smart-SWS lassen sich anhand der lokalen Ökosystemfunktionen bewerten, für welche sich insgesamt eine Verbesserung bzw. Stützung ergibt. Ausschlaggebend sind die Wasserbereitstellung und das Abfedern von Überflutungen.

### Perspektiven für die Praxis

Die in Smart-SWS konzipierten Anlagen demonstrieren das vielfältige Potenzial der verbesserten Bewirtschaftung lokaler Grundwasserleiter mittels dezentraler Grundwasseranreicherung. Zur nachhaltigen Stützung des Landschaftswasserhaushalts und damit zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels können die multifunktionalen Speicheranlagen einen großen Beitrag leisten. Die Umsetzung der Pilotanlage in der Hallertau demonstriert die Machbarkeit und den Mehrwert künstlicher Grundwasseranreicherung. Der gut instrumentierte und wissenschaftlich kontinuierlich begleitete Forschungsstandort bietet dabei die Möglichkeit, die Akzeptanz solcher Systeme zu erhöhen und belastbare Daten zu erheben. Das entwickelte Monitoring- und Regelungssystem zur Konformitätsüberwachung ist auf ähnliche Systeme übertragbar, ebenso wie die entwickelten kostengünstigen Sensorboxen. Die Verknüpfung der Anlage mit der konkreten Nutzung des Wassers, beispielsweise zur Bewässerung, eröffnet neue Perspektiven für Kooperationen. Der rechtliche Rahmen wird dabei zurzeit intensiv diskutiert und hinterfragt, so dass eine eindeutigere Regelung in den kommenden Jahren wahrscheinlich ist.



Abb.6 Smart-SWS Pilotanlage zur künstlichen Grundwasseranreicherung in der Hallertau (©L. Augustin, 18.12.2024)

### ADAPTION AN WASSER-EXTREMEREIGNISSE: DÜRREMANAGEMENT, INTEGRIERTE WASSERBEWIRTSCHAFTUNGSKONZEPTE UND VERBESSERTE WASSERSPEICHERUNG IN DER REGION BERLIN-BRANDENBURG

Ziel von SpreeWasser:N war es zusammen mit verschiedenen Wassernutzern und Behörden langfristige Handlungsoptionen zu erarbeiten, um ein interdisziplinäres und integriertes Wassermanagement für die Region zwischen Spreewald und Berlin zu entwickeln.

**Laufzeit:** 01.04.2021 - 31.12.2025

**Koordinator:** Prof. Dr. Irina Engelhardt, Technische Universität Berlin – Fachgebiet Hydrogeologie [irina.engelhardt@tu-berlin.de](mailto:irina.engelhardt@tu-berlin.de)

**Webseite:** <http://www.spreewasser-n.de>

**Verbundpartner:**

- » Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V. (ZALF)
- » Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- » Freie Universität Berlin, AG Klimadiagnostik und meteorologische Extremereignisse
- » Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
- » Universität Trier, Institut für Deutsches und Europäisches Wasserwirtschaftsrecht
- » adelphi research
- » Berliner Wasserbetriebe, AöR
- » Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH
- » TRUEBNER GmbH

#### Hintergrund und Ziele

Die Region Berlin-Brandenburg weist eines der höchsten Wasserdefizite und Dürreerisiken in Deutschland auf. Der Klimawandel und der Kohleausstieg im Lausitzer Revier beeinflussen die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Spree erheblich. Für eine verbesserte Wasserbewirtschaftung wurden im Rahmen des Projektes neue Handlungsoptionen zur verbesserten Wasserspeicherung sowie innovative Werkzeuge für ein integriertes Wassermanagement entwickelt. Dafür wurden verschiedene Teilziele definiert: (1) die Entwicklung und Kopplung meteorologischer, hydrologisch-wasserwirtschaftlicher und hydrogeologischer Modelle, (2) die Entwicklung eines Online-Dürre-Frühwarnsystems, (3) die Entwicklung rechtlicher Modelle des Trockenheitsmanagements zum Vorgehen bei Wasserknappheit und (4) die Identifikation neuer Wasserspeicher unter den Aspekten Effizienz, Kosten und Machbarkeit.

Die Ergebnisse fließen in eine Speicher-Tool-Box ein, welche Wasserversorger dabei unterstützt, geeignete Standorte zu bestimmen, um Starkniederschlag gezielt zwischenspeichern und in den

Untergrund zu infiltrieren. Dies ermöglicht, die Grundwasserneubildung künstlich zu erhöhen und die Grundwasserressourcen anzureichern.

#### Zentrale Ergebnisse

Mit Hilfe eines hydrologischen-wasserwirtschaftlichen Modells wurde basierend auf Wettersimulationen die **Dynamik der Spree** und die **Effizienz verschiedener wasserwirtschaftlicher Maßnahmen** (z.B. Überleitung, Wasserspeicherung in Seen und Talsperren) für verschiedene ökonomische und klimatische Szenarien ermittelt. Zusätzlich wurden charakteristische Wetterlagen ermittelt, die zu einer **Hoch- oder Niedrigwassersituation** führen. Ein Gewässergütemodell simuliert den künftigen **Zustand der Gewässerqualität** in Abhängigkeit von möglichen Bewirtschaftungsstrategien und klimatischen Entwicklungen. Ein Grundwassermodell berechnet die Grundwasserdynamik und gespeicherte Grundwasservolumina und bildet ab, wie der Grundwasserleiter auf den Klimawandel reagiert. Mit seiner Hilfe lässt sich auch die **Effizienz verschiedener Strategien zur künstlichen Grundwasseranreicherung** prüfen. Das dient der Identifikation von opti-

malen Standorten und von Entnahme- und Anreicherungsmethoden. Basierend auf umfangreichen Datenerhebungen konnten **Szenarien für den zukünftigen urbanen, landwirtschaftlichen und industriellen Wasserbedarf** entwickelt und in die Modelle integriert werden.

Die Projektergebnisse zeigen, dass der Wassermangel in der Region primär durch klimatische Veränderungen bedingt ist und erst in zweiter Linie durch Grundwasserentnahmen. Eine Analyse der letzten 20 Jahre zeigt sogar Dürren, die bis in die Herbstmonate reichen. Die Grundwasserneubildung ist der Schlüsselparameter, der die Antwort des hydrologischen Systems bestimmt, das heißt die Dynamik der Flüsse und des Grundwassers wird primär durch Grundwasserneubildung gesteuert. Berechnungen zeigen, dass Überschusswasser aus Winter und Herbstperioden ca. 20-30% des Trinkwasserbedarfes substituieren könnte, wenn es zur künstlichen Grundwasseranreicherung genutzt wird. Eine Analyse zur Identifizierung geeigneter Gebiete zeigte, dass geeignete Flächen für die künstliche Grundwasseranreicherung in oberflächennahen Grundwasserspeichern nur begrenzt zur Verfügung stehen, während die Grundwasseranreicherung im tiefen Grundwasserleiter zwar mit deutlich höheren Kosten verbunden ist, jedoch an vielen Waldstandorten einsetzbar wäre.

Nach Wasserrecht bedarf die künstliche Grundwasseranreicherung mangels Sonderregelungen grundsätzlich der **behördlichen Gestattung im Einzelfall**. In Wassermangelsituationen ist der öf-

fentlichen Wasserversorgung Vorrang einzuräumen; die weitere gesetzliche Priorisierung von Wassernutzungen ist derzeit nicht vorgesehen.

#### Perspektiven für die Praxis

Die in SpreeWasser:N entwickelte Speicher-Toolbox ermöglicht es Anwender:innen aus der Praxis, geeignete Standorte für die Wasserspeicherung zu bestimmen. Die Toolbox umfasst verschiedene Methoden und Maßnahmen, wie z.B. kontrollierte Drainagen, künstliche Grundwasseranreicherung und Wasserspeicherung in Senken. Jede Maßnahme zur Wasserspeicherung wurde bezüglich ihrer Effizienz, Kosten und Machbarkeit bewertet. Darüber hinaus enthält die Speicher-Toolbox auch eine juristische Bewertung der Maßnahme. Das Dürre-Frühwarnsystem gibt Bewirtschaftungsvorschläge zur Ertragsoptimierung für verschiedene Kulturpflanzen aus. Entscheidungsträger:innen auf regionaler Ebene profitieren von Hinweisen auf Entnahmespitzen für die Vorhaltung von Wasserreserven oder die Vorbereitung von Entnahmeverboten.

Sowohl das Dürre-Frühwarnsystem als auch die Speicher-Toolbox wurden zunächst in Form von Schulungen evaluiert und verbessert und anschließend an Nutzer:innen aus der Praxis übergeben.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse von SpreeWasser:N in zahlreichen Dialogen mit Bürger:innen und auf Workshops kommuniziert, um ein Bewusstsein in der Bevölkerung und der Politik für die zukünftigen Herausforderung und Lösungsansätze in der Region zu schaffen.

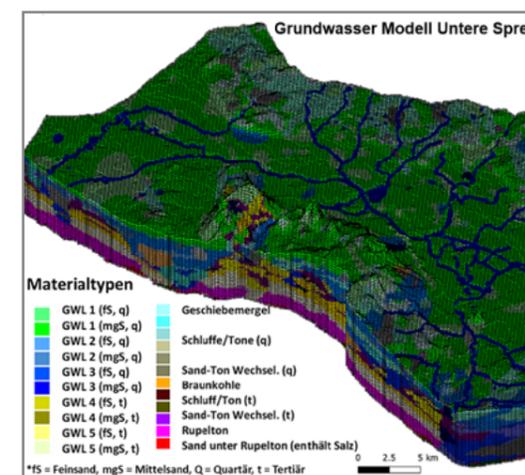


Abb.7 Grundwassermodell Untere Spree ©Abdelrahman, TU Berlin

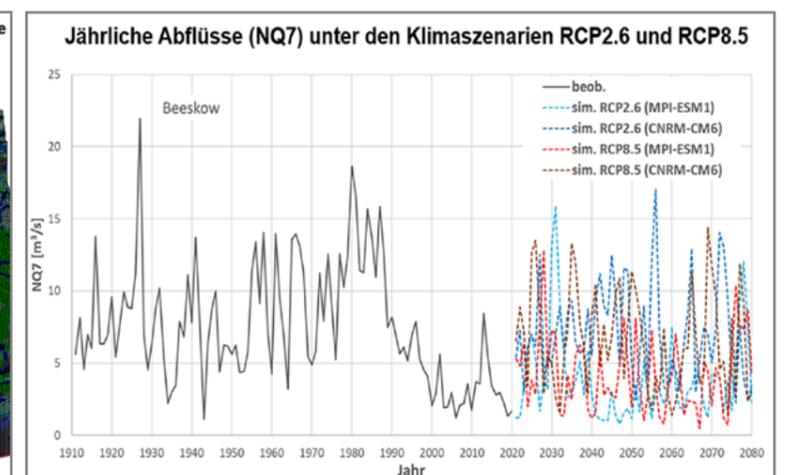


Abb.8 Jährliche Abflüsse (NQ7) unter den Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 ©Koch, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK

## ANPASSUNGSSTRATEGIEN DER ÖFFENTLICHEN TRINKWASSERVERSORGUNG AN EXTREMEREIGNISSE

Um die Resilienz der öffentlichen Wasserversorgung gegenüber Extremereignissen zu verbessern, entwickelte TrinkXtrem insgesamt vier Softwaretools und neun Methoden und Konzepte. Dabei wurde die gesamte Prozesskette von der Rohwasserfassung bis zur Trinkwasserverteilung adressiert.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.01.2025
<b>Koordinator:</b>	Dr. Uwe Müller, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser <a href="mailto:uwe.mueller@tzw.de">uwe.mueller@tzw.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://www.trinkxtrem.de">https://www.trinkxtrem.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen (IIS)</li> <li>» Harzwasserwerke GmbH</li> <li>» Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH</li> <li>» IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH</li> <li>» MOcons GmbH &amp; Co. KG</li> <li>» Technische Universität Clausthal, Institute for Software and Systems Engineering</li> <li>» Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung</li> <li>» Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH (WVR)</li> <li>» Zweckverband Landeswasserversorgung</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Meteorologische Extremereignisse wie langanhaltende Trockenperioden stellen die öffentliche Wasserversorgung in einigen Gebieten Deutschlands vor Herausforderungen. Extremereignisse wirken über die gesamte Prozesskette der Wasserversorgung. Durch die lokale Prägung der Wasserversorgung sind die Auswirkungen von Extremereignissen auf die einzelnen Wasserversorgungsunternehmen zudem unterschiedlich. Das Projekt TrinkXtrem entwickelte Betriebsstrategien für die öffentliche Wasserversorgung, um wissenschaftlich fundiert und vorausschauend auf Extremereignisse zu reagieren. Schwerpunkte des Projekts lagen in der Qualität und Quantität der Rohwässer, der Steuerung des Anlagenbetriebs, der Prognose des Trinkwasserbedarfs sowie dynamischen Preismodellen. Die Entwicklung von Risiko- und Vorsorgekonzepten gehörte ebenfalls zum Projekt. Die Untersuchungen wurden maßgeblich an den großtechnischen Wasserversorgungsanlagen der Projektpartner durchgeführt.

### Zentrale Ergebnisse

Im Projekt TrinkXtrem wurden neun Methoden und Konzepte für den Anlagenbetrieb unter Extrembedingungen entwickelt. Zudem entstanden vier Softwarelösungen in den Ausbaustufen Technology Readiness Level 5 bis 6. Eine Auswahl der Ergebnisse ist nachfolgend dargestellt.

- » Mit dem in TrinkXtrem entwickelten Managementtool liegt eine Software vor, mit der die zur Trinkwassergewinnung zur Verfügung stehenden **Ressourcen durch den Wasserversorger optimal genutzt** werden können. Steuerungsparameter sind Versorgungssicherheit, Trinkwasserqualität sowie Kosten.
- » Die Uferfiltratgewinnung weist prinzipiell eine bessere Resilienz gegenüber hydrologischen Extremereignissen auf als herkömmliche Grundwassergewinnungen. Es wurden neue Bewirtschaftungskonzepte, wie z. B. eine **infiltrationsgestützte Uferfiltratgewinnung**, abgeleitet.
- » Um bei extremem Trinkwasserbedarf **Vulnerabilitäten im Verteilungsnetz** zu erkennen und zu beheben, wurde eine Methode auf Basis der mathematischen Optimierung erstellt. Damit werden verschiedene Versorgungssituationen im Netz dargestellt und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.
- » Für die Vorhersage des mittleren **Trinkwasserbedarfs** und des Spitzenbedarfs wurden Prognosemodelle auf Basis des maschinellen Lernens entwickelt. Die Modelle basieren auf einem Training mit Betriebsdaten der Wasserversorger sowie weiteren Daten.

- » Eine gleichzeitig hohe Wassernachfrage aller Kunden gefährdet die Versorgungssicherheit und erhöht die Kosten. Daher wurden Handlungsempfehlungen für Wasserversorger zum Einsatz **dynamischer Preismodell-Komponenten** entwickelt, um Betriebs- und Investitionskosten zu senken und Anreize für eine Nachfrageverschiebung zu schaffen.
- » Zum quantitativen Management ihrer Rohwasserressourcen verfügen verschiedene Wasserversorgungsunternehmen über Grundwassermodelle. Mit der in TrinkXtrem angewendeten Methodik der **globalen Sensitivitätsanalyse und Modellkalibrierung** wurde die Prognosefähigkeit eines bestehenden Grundwassermodells weiter verbessert. Dadurch werden die Auswirkungen von Extremereignissen zuverlässiger prognostiziert.
- » Die wirkungsbezogene Analytik erlaubt, die **Wasserqualität aus toxikologischer Sicht** einzuschätzen. Bei Stichprobenuntersuchungen an Rohwässern zeigte sich u. a., dass bei Tal-sperrenwässern als Folge der jahreszeitlichen Umwälzung die östrogene Wirkung verändert wird.
- » Es wurde eine Methodik entwickelt, um bestehende, GIS-gestützte **Risikomanagementsysteme** für Trinkwassereinzugsgebiete auf Extremereignisse zu erweitern.
- » Mit der in TrinkXtrem entwickelten Methodik können Wasserversorger anschaulich abschätzen, wie sich **mehrere Trockenjahre in Folge** auf ihr Rohwasserangebot auswirken würden.

### Perspektiven für die Praxis

Die in TrinkXtrem entstandenen Lösungsoptionen werden nach Projektende bei den Projektpartnern weitergehend getestet und stehen anschließend auch anderen Wasserversorgern zur Verfügung:

- » Das Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung wird beim Projektpartner Zweckverband Landeswasserversorgung für die saisonale Bewirtschaftungsplanung der Rohwasserressourcen getestet.
- » Die geologischen Modellbetrachtungen zur Uferfiltration werden vom Projektpartner Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz eingesetzt, um dessen bestehende Uferfiltratgewinnungen an den Standorten Bodenheim und Guntersblum zu erweitern.
- » Das mathematische Optimierungsmodell wird beim Projektpartner Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz angewendet, um Schwachstellen des Versorgungsnetzes bei künftigen langen, heißen Trockenphasen zu identifizieren und um notwendige Zubaumaßnahmen in der Versorgungsinfrastruktur zu planen und zu realisieren.
- » Für die Trinkwasserbedarfsprognose steht ein Web-Service zur Verfügung, um für Wasserversorgungsunternehmen den Trinkwasserbedarf in einem Versorgungsgebiet mit Hilfe von KI vorherzusagen. Ein großtechnischer Test erfolgte bei dem Zweckverband Landeswasserversorgung.
- » Preismodellkomponenten können in bestehende Entgeltmodelle von Wasserversorgern integriert werden. Zwischenergebnisse aus dem Projekt wurden bereits in verschiedenen Gesprächen mit Wasserversorgern erörtert und Rückmeldungen berücksichtigt.



Abb.9 Trinkwasser in ausreichender Menge und höchster Qualität auch unter Extrembedingungen – TrinkXtrem liefert Praxistools für die öffentliche Wasserversorgung  
(©Projekt TrinkXtrem)

## KOMBINIERTER INFRASTRUKTUR- UND UMWELT-SCHUTZ DURCH KI-BASIERTE KANALNETZBEWIRTSCHAFTUNG

Das Projekt InSchuKa4.0 entwickelte eine KI-basierte Kanalnetzbewirtschaftung mit moderner Sensorik und intelligenter Datenanalyse für extreme Wetterereignisse. Das innovative System kombiniert automatisierte Ausrüstungselemente mit historischen Betriebsdaten und Wetterprognosen.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.10.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Günter Müller-Czygan, Hochschule Hof <a href="mailto:guenter.mueller-czygan@hof-university.de">guenter.mueller-czygan@hof-university.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://inwa.hof-university.de/projekt/inschuka4-0">https://inwa.hof-university.de/projekt/inschuka4-0</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit</li> <li>» HST Systemtechnik GmbH &amp; Co. KG</li> <li>» PEGASYS Gesellschaft für Automation und Datensysteme mbH</li> <li>» Nivus GmbH</li> <li>» JenaWasser</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Das Projekt behandelt das Management von Abwasserinfrastrukturen im Zusammenhang mit Risiken aus hydrologischen und urbanen wasserbezogenen Extremereignissen. Im Zentrum steht das Problem, dass bei Starkregen Speicherkapazitäten unzureichend genutzt werden, was Entlastungsereignisse erforderlich macht, sowie starke Ablagerungen auf Kanalsohlen bei länger anhaltenden Trockenperioden. Mit Hilfe digitaler Tools für Überwachung, Analyse, Prognose und Kommunikation wird ein innovatives Kanalnetzmanagementsystem entwickelt, welches sich optimal an Extremwetterereignisse anpasst und die angeschlossenen Kläranlagen mit einbezieht.

Die Lösung beinhaltet den Einsatz neuartiger Sensortechnik, cyberphysischer Ausrüstungselemente zur Kontrolle von Wasserstand und -menge sowie die Berücksichtigung von historischen und Prognosedaten. Ergänzend wird das Erfahrungswissen des Betriebspersonals gezielt als Eingabeinformation in die Datenbasis genutzt. Dadurch kann eine optimale Ausnutzung vorhandener Speichervolumen und eine automatische vorbeugende Spülung von Kanalabschnitten (insbesondere in Trockenperioden) ermöglicht sowie eine unkontrollierte Ausschwemmung von Schadstoffen bei extremen Regenereignissen verhindert werden.

### Zentrale Ergebnisse

Die Basis der Entwicklung einer Kanalnetzbewirtschaftung stellen **hydrodynamische Simulationen** dar. Sie dienen der Ermittlung der verschiedenen Betriebssituationen unter normalen und extremen Wettereinflüssen, um ein Funktionsverständnis für das vorhandene Kanalnetz zu bekommen. Die Simulationen zeigen, welche Speicherkapazitäten bislang genutzt werden, welches Potenzial vorhanden ist und mit welchem technischen Equipment, wie z.B. einem steuerbaren Klappensystem, das zusätzliche Speicherpotenzial nutzbar gemacht werden kann. Im weiteren Verlauf der Simulationen wurde untersucht, bei welchen Betriebssituationen die größten Ablagerungen entstehen können und wie das technische Equipment zu steuern ist, um diese Ablagerungen zu beseitigen bzw. deren Entstehung durch vorbeugende Spülvorgänge zu vermeiden.

Kern des Steuerungssystems ist die Integration des sogenannten **Case-Based-Reasoning-Verfahrens (CBR)**, einem KI-System, welches historische mit aktuellen Betriebsbedingungen vergleicht und daraus optimale Betriebseinstellungen ermittelt. Durch die umfangreiche **Analyse historischer Betriebsbedingungen** wurden die zugehörigen **wirksamsten Betriebseinstellungen** für das ausgewählte technische Equipment berechnet. Diese gehen als Solleinstellungen in das **innovative**

**Steuerungssystem** ein. Im Realbetrieb prüft das CBR die aktuellen Betriebsbedingungen, vergleicht diese mit den historischen Ereignissen und errechnet, welchem Ereignis die aktuelle Realität am nächsten kommt. Aus der besten Übereinstimmung wählt das Steuerungssystem die passenden Solleinstellungen aus. Im ersten Schritt bekommt das Betriebspersonal eine Übersicht über mögliche Betriebseinstellungen zur manuellen Auswahl. Die Integration des Wettervorhersagesystems Nira.web, das über eine 48-Stunden-Niederschlagsprognose verfügt, ermöglicht im nächsten Schritt eine präzisere Auswahl geeigneter Steuerungsszenarien und verbessert die Qualität der automatisierten Entscheidungsfindung erheblich.

Der Umgang mit **Starkregen** wird in erster Linie mit der CBR-Lösung optimiert, um das **maximale Stauvolumenpotenzial je Betriebsbedingung** zu erreichen. Um das Problem von **Ablagerungen während langanhaltender Trockenperioden** zu minimieren, nutzt das Betriebspersonal die Erkenntnisse aus den verschiedenen Simulationen und leitet daraus die erforderlichen Betriebseinstellungen ab. Durch die Integration eines neuartigen Sensors zur Erfassung von Feststoffen auf der Kanalsohle können **präventive Spülvorgänge** sogar automatisch erfolgen.

### Perspektiven für die Praxis

Das Vorhaben InSchuKa4.0 hat gezeigt, welches Speicherpotenzial in bestehenden Kanalsystemen steckt und dass eine auf IT bzw. KI-basierte Lösung nur einen Bruchteil an Kosten verursacht,

als eine vergleichbare konventionelle bautechnische Herstellung von Speicherräumen, z.B. von Regenrückhaltebecken. Die Berechnungen zeigen, dass für den untersuchten Anwendungsfall bis zu 12.000 m<sup>3</sup> an vorhandenem Speicherraum zusätzlich aktiviert werden können. Würde man dies in Form von Regenbecken realisieren, wären Investitionskosten von 15 bis 20 Millionen Euro notwendig, während die technisch-innovative Erhöhung des vorhandenen Kanalnetzes je nach Art des technischen Equipments rund 1,5 bis 2,5 Millionen Euro ausmachen würde.

Der entwickelte Prototyp kann auf viele weitere Anwendungsfälle übertragen werden und wird von potenziellen kommunalen Anwender:innen akzeptiert. Aus den Ergebnissen werden die notwendigen Voraussetzungen zum Lösungstransfer auf unterschiedliche Rahmenbedingungen abgeleitet und beschrieben. Dies berücksichtigt neben technischen Anforderungen auch relevante organisationskulturelle und entscheidungspsychologische Kriterien.

Die entwickelte KI-basierte Kanalnetzbewirtschaftung bietet ein großes Potenzial, kommunale Entwässerungssysteme an extreme Wetterereignisse anzupassen. Die Kombination aus intelligenter Sensorik, automatisierter Steuerung und Wetterprognosen erlaubt eine deutlich effizientere Bewirtschaftung bestehender Infrastrukturen durch bessere Nutzung des vorhandenen Kanalvolumens bei Starkregenereignissen sowie präventiver Ablagerungsbeseitigung.



Abb.10 Einbau eines steuerbaren Klappensystems im Jenaer Kanalnetz (©HST)

## DIGITALER ZWILLING ZUM KI-UNTERSTÜTZTEN MANAGEMENT VON WASSER-EXTREMEREIGNISSEN IM URBANEN RAUM

Im Verbundprojekt Zwille wurden die siedlungswasserwirtschaftlichen Auswirkungen von Wasserextremereignissen im urbanen Raum vorhergesagt und durch den Einsatz eines Digitalen Zwillings der Entwässerungsinfrastruktur sektorenübergreifend proaktiv gemanagt.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.07.2025
<b>Koordinator:</b>	Dr. Alexander Krebs, Eviden Germany GmbH <a href="mailto:alexander.krebs@eviden.com">alexander.krebs@eviden.com</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://zwille-projekt.de">https://zwille-projekt.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Stadtentwässerung Hannover, Eigenbetrieb der Landeshauptstadt Hannover</li> <li>» Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH (ifs)</li> <li>» hydro &amp; meteo GmbH</li> <li>» Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak)</li> <li>» Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH (IAB)</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Das Ziel des Verbundprojektes Zwille bestand in der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für die Erstellung eines virtuellen Abbildes einer städtischen Entwässerungsinfrastruktur als Basis für eine proaktive Bewältigung von extremen Niederschlagsereignissen. Am Beispiel der Stadt Hannover entstand ein Digitaler Zwilling, welcher auf Grundlage von aktuellen Messdaten und Simulationsmodellen den aktuellen Zustand des abgebildeten Systems widerspiegelt. Durch die Einbeziehung von Prognosen der wichtigsten Einflussfaktoren, wie z.B. Niederschlags- und Abflussdaten, wird eine vorausschauende Szenario-Analyse ermöglicht. Der Digitale Zwilling liefert dem Betriebspersonal zudem Handlungsempfehlungen zum Umgang mit extremen Niederschlagsereignissen, um hierdurch beispielsweise Überflutungsschäden im Stadtgebiet sowie Mischwasserabschläge in die Gewässer zu reduzieren.

### Zentrale Ergebnisse

Mittels einer kartenbasierten Visualisierung stellt der in Zwille entwickelte Digitale Zwilling dem Betriebspersonal der Stadtentwässerung Hannover zum einen die aktuelle sowie die in naher Zukunft zu erwartende regionale Niederschlagsituation im Stadtgebiet dar. Zum anderen werden den technischen Betriebsmitarbeitenden auf den Leitwarten die aus dem aktuellen und dem erwarteten Niederschlag resultierenden Auswirkungen in den verschiedenen Teilbereichen des Entwässerungs-

systems verdeutlicht: a) der aus aktuellen und prognostizierten Niederschlägen jeweils resultierende **Oberflächenabfluss** in den städtischen Teileinzugsgebieten inklusive aktueller und zu erwartender **Überflutungsbereiche**, b) die aktuelle sowie die zu erwartende **Belastungssituation** im **Kanalnetz** einschließlich der Eingangspumpwerke und der beiden Kläranlagen sowie c) etwaige daraus resultierende **Regenwassereinleitungen** sowie **Mischwasserabschläge** in die Gewässer Leine und Ihme und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die stoffliche **Gewässerbeschaffenheit** (Qualität). Schließlich bietet das System dem Betriebspersonal **Maßnahmenvorschläge** (z.B. in Bezug auf die Steuerung des Abflussgeschehens in den vier Hauptsammlern in Hannover) zum Management des akuten Niederschlagsereignisses sowie zur proaktiven Vorbereitung auf das bevorstehende Ereignis.

Um die vorgenannten Darstellungen der Systemzustände für das Betriebspersonal zu erzeugen, werden verschiedene **fachlich-technische Lösungsmodule als Grundlage für den Digitalen Zwilling** zusammengeführt, u. a.:

**1. Echtzeitfähiges Simulationsmodell:** Als zentrale Komponente des Digitalen Zwillings wurde ein integriertes, **kombiniert hydrologisch-hydrodynamisches Simulationsmodell des Kanalnetzes und der Kläranlagen** zur virtuellen Abbildung und Prognose der dynamischen Prozesse entwickelt, das

als Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen zur Abflusssteuerung dient. Insbesondere die unmittelbare Kopplung von hydrodynamisch und hydrologisch modellierten Netzteilen in einem einzigen Modell stellt hierbei ein Novum dar.

**2. Echtzeitmessdaten:** Im Digitalen Zwilling werden nicht nur statische Systemdaten der vorhandenen städtischen Infrastruktur abgebildet, sondern auch dynamische Prozessdaten in Form von **Echtzeitmessdaten von Niederschlag, Wassermenge und -qualität**. Neben Bestandsmessdaten aus unterschiedlichen Quellen werden zusätzlich Messdaten aus einem temporären Messprogramm mit neu eingerichteter Sensorik (UV/VIS-Spektrometer- und Multi-Parameter-Sonden) in Kanalnetz, Kläranlagen und Einleitungsgewässern berücksichtigt. Diese werden den anderen Komponenten des Digitalen Zwillings über eine FIWARE-basierte Daten- und Kommunikationsinfrastruktur mit standardisierten Schnittstellen zur Verfügung gestellt.

**3. Hochauflösende Niederschlagsprognosen:** Für die Simulation des hydrologisch-hydraulischen Prozessgeschehens stellen die Niederschläge die wesentliche Belastungsgröße dar. Für diesen Input werden korrigierte und angeeichte **Niederschlagsmessdaten** des DWD-Radars Hannover und der elf städtischen Regenschreiberstationen in **Nahezu-Echtzeit** aufbereitet und um numerische Wettermodelldaten (ICON-D2-EPS) ergänzt. Nie-

derschlagsprognosen werden mittels **Radar-Nowcasts als Ensemblevorhersagen** mit 500m-Rasterauflösung erzeugt.

**4. Überflutungsprognose:** Zudem wurde ein Ansatz zur **Vorhersage des urbanen Überflutungsrisikos** entwickelt, der auf den zuvor beschriebenen Ensemble-Nowcasts sowie vorgerechneten Modellergebnissen aus einem gekoppelten 1D-/2D-Modell zur Simulation von Kanal- und Oberflächenabfluss basiert und als Ergebnis eine **Risikokarte für die Niederschlagsereignisse** liefert.

### Perspektiven für die Praxis

Der Fokus der zuvor beschriebenen Arbeiten und des dabei verfolgten Vorgehens lag stets auf der Erzielung einer hohen **Offenheit und Übertragbarkeit der Herangehensweise auf andere Städte und Gemeinden**. Im Ergebnis ist der gewählte Ansatz mit einem moderaten Anpassungsbedarf (insbesondere zur Berücksichtigung alternativer städtischer Gegebenheiten) auch auf andere Anwendungsfälle außerhalb des Pilotgebietes Hannover übertragbar. Wichtig dabei sind v. a. die frühzeitige Berücksichtigung von organisatorischen und rechtlichen Fragestellungen bzw. von Anforderungen für Kritische Infrastrukturen (KRITIS) in Bezug auf die Bereitstellung der erforderlichen meteorologischen und hydrologischen Modell- und Messdaten sowie der Bestands- und Infrastrukturdaten des Entwässerungssystems.

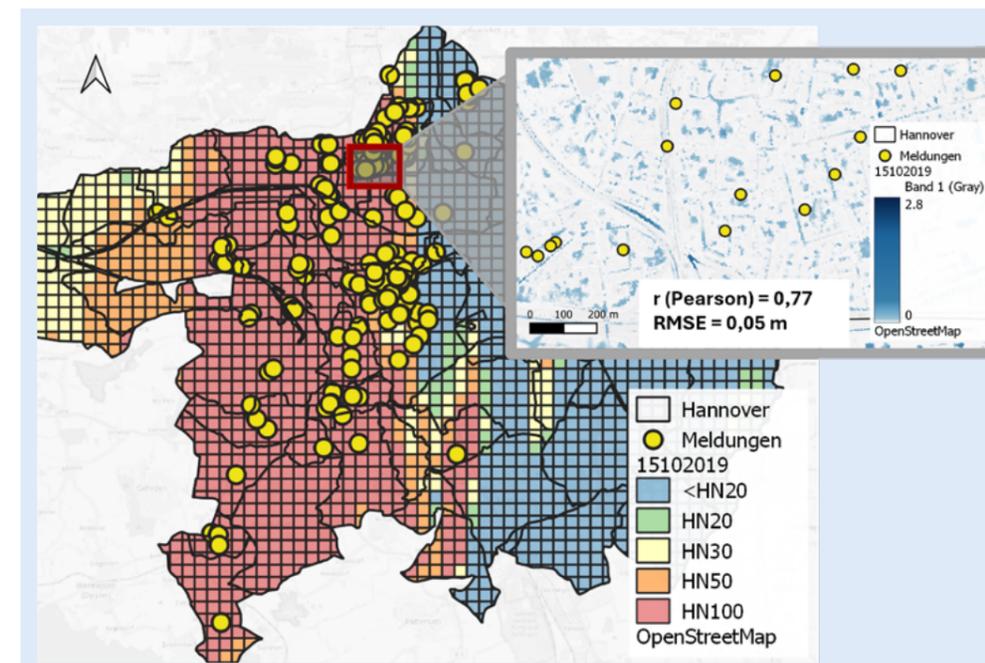


Abb.11 Abschätzung des Überflutungsrisikos anhand der maximal erreichten Wiederkehrzeit des Niederschlags am Beispiel eines Starkregenereignisses vom 15.10.2019 in Hannover. Zur Validierung sind Meldungen von Feuerwehreinheiten eingetragen. Bildausschnitt: Maximaler Wasserstand mit dem in Zwille entwickelten Verfahren für die Echtzeitberechnung und Vorhersage. Qualitätsindizes im Vergleich zur Nachsimulation mit dem gekoppelten Kanalnetz- und Oberflächenmodell System-Extran 2D. ©Zwille-Konsortium

## EXTREMWETTERMANAGEMENT MIT DIGITALEN MULTISKALEN-METHODEN

Kernziel des Projektes EXDIMUM ist die Optimierung des Extremwassermanagements im Spektrum komplexer Herausforderungen durch das ganzheitliche Zusammenspiel von Datenerhebung und Modellierung auf multiplen Skalen sowie die Ableitung konkreter Maßnahmen.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.07.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr. Sándor Fekete, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig <a href="mailto:s.fekete@tu-bs.de">s.fekete@tu-bs.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="http://www.exdimum.org">http://www.exdimum.org</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Technische Universität Clausthal</li> <li>» Christian-Albrechts-Universität zu Kiel</li> <li>» DSI Aerospace Technologie GmbH</li> <li>» REMONDIS Aqua Industrie GmbH &amp; Co. KG</li> <li>» AMENO GmbH</li> <li>» EURAWASSER Betriebsführungsgesellschaft mbH</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Die globalen Klimaveränderungen gehen nicht nur mit einer Veränderung der durchschnittlichen Niederschlagsmengen einher, sondern auch mit einer Verstärkung der Extreme wie besonderer Trockenheit und lokaler Starkregenereignisse. Der Forschungsansatz von EXDIMUM beruht daher auf der ganzheitlichen Kombination von Datenerhebung, Modellierung auf multiplen räumlichen und zeitlichen Skalen sowie abgeleiteten Maßnahmen. Dies beinhaltet insbesondere die Nutzung von hochaufgelösten Satellitenaufnahmen, die Einbeziehung von digitalen Geländemodellen und die gezielte, zuverlässige Erhebung von terrestrischen Sensordaten. Das Zusammenspiel dieser multimodalen Datenquellen für die Zustandserfassung und Analyse von Extremwetter Szenarien zielt dabei auf kurz- und langfristige Prognosen ab. Darauf aufbauend sollen zudem fundierte längerfristige Handlungsempfehlungen für Netzbetreiber und regionale Planungsstäbe zum Umgang mit extremen Starkregen- und Trockenheitsszenarien entwickelt werden. Die entwickelten Ansätze werden in der Region um Goslar im Harz pilothaft erprobt.

### Zentrale Ergebnisse

Das breite Spektrum der Untersuchungen, die große Bandbreite von Datenquellen sowie die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Datenerhebung und Modellierung erlauben nicht nur langfristige und großflächige Analysen, sondern auch

die Bereitstellung verlässlicher und detaillierter Informationen in lokalen Extremsituationen.

So gelang es im Verlauf von EXDIMUM, projektspezifische drahtlose Sensorik zu entwickeln, in der Pilotregion rund um Goslar zu installieren und für Messungen einzusetzen. Dieses robuste Sensornetz liefert auch in Extremsituationen aussagekräftige Echtzeitdaten zum Zustand von Wasser und Gelände. Zusätzlich wurden Tests bezüglich Bodenfeuchte, Boden- und Vegetationszustand durchgeführt. Hochaufgelöste, dreidimensionale Geländedaten ermöglichen eine detaillierte Modellierung und dynamische Simulation von Wasserstand und Abfluss bei Starkregenereignissen. Für die Diagnose und Prognose ausgedehnter Trockenheitsentwicklung wurden KI-gestützte Methoden auf der Basis hochaufgelöster Satellitenbilder entwickelt, durch die auch die längerfristige Entwicklung der trockenheitsbedingten Vegetationsveränderung nachvollzogen werden konnte.

Gerade in Gebieten mit signifikantem Gefälle stellt die Analyse großräumiger, dynamischer Überflutungsereignisse eine besondere Herausforderung dar. Grund ist die komplexe Modellierung des zeitabhängigen Verhaltens großer Mengen fließenden Wassers. Hier konnten besondere Fortschritte bei der skalierbaren Simulation von dynamischen Verläufen auf der Basis von Niederschlags- und Geländedaten erzielt werden. Dabei gelang es,

mithilfe geometriebasierter adaptiver algorithmischer Verfahren zur Beschleunigung von Berechnungsverfahren die Simulation komplexer dynamischer Ereignisse schneller als in Echtzeit zu ermöglichen. Dieser Fortschritt bietet nicht nur aussichtsreiche Perspektiven für den Einsatz im akuten Ernstfall, sondern auch realistische Perspektiven für die interaktive Modellierung, Planung und Analyse präventiver Maßnahmen. Besonders hervorzuheben sind in diesem Kontext die auf der Basis algorithmischer Stabilitätsbetrachtungen entwickelten Ansätze zur Identifikation kritischer Bereiche, in denen der Einsatz von Ressourcen besonders wirksam zur Schadensminimierung beitragen kann.

### Perspektiven für die Praxis

Um die Übertragbarkeit und praktische Perspektive der Projektergebnisse sicherzustellen, wurden mit Expertinnen und Experten aus der Praxis projektbegleitende Gespräche geführt. Im Rahmen dieser Netzwerkbildung gelang es schon während der Projektlaufzeit für verschiedene Projektteile, Kontakte zu

Stakeholdern herzustellen und dabei auch den Transfer in andere Regionen einzuleiten. Zur Unterstützung des Praxistransfers wurde zudem eine umfangreiche Datenerhebung mit einschlägigen Interessengruppen durchgeführt, um zielgruppenspezifische Bedürfnisse berücksichtigen zu können und weitere Verwertungsperspektiven zu gewinnen.

Neben den Fortschritten bei Modellierung, Datenerhebung und -auswertung lassen vor allem die Auswertung von vorab nicht planbaren Extremereignissen im Harz bereits jetzt eindrucksvoll die potenzielle Wirksamkeit des Projektes erkennen. Im Zusammenspiel mit Expert:innen der Stadt Goslar konnten vielversprechende Perspektiven für die Modellierung, Planung und Analyse von Maßnahmen zur Krisenprävention erarbeitet werden. Darüber hinaus konnte in weiteren Untersuchungen die reibungslose Übertragbarkeit der erarbeiteten Methoden auf andere Regionen nachgewiesen werden, was die allgemeinere Wirksamkeit der Projektergebnisse über die Pilotregion hinaus sicherstellt.



Abb.12 Robustheitsanalyse für die Identifikation von Konstellationen, die für die Wirksamkeit von Maßnahmen besonders kritisch sind (©Fekete/TU Braunschweig).



Abb.13 Arbeitssitzung mit Experten der Stadt Goslar vor Ort im Dezember 2024 zum Praxistransfer der Methoden; draußen im Hintergrund die kritische Kreuzung auf der Abbildung (©Fekete/TU Braunschweig).

## AUSWIRKUNGSBASIERTE VORHERSAGE VON STARKREGEN UND STURZFLUTEN AUF VERSCHIEDENEN SKALEN: POTENZIALE, UNSICHERHEITEN UND GRENZEN

Ziel von AVOSS war die stringente Verknüpfung von Starkregenereignissen, davon ausgehenden Sturzflutgefahren und potentiell resultierenden Schäden auf verschiedenen räumlichen Skalen. Insbesondere die Verbesserung der Frühwarnung und die örtliche Umsetzung standen im Fokus des Projekts.

<b>Laufzeit:</b>	01.04.2022 - 30.09.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr. Markus Weiler, Universität Freiburg <a href="mailto:markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de">markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="http://www.avoss.uni-freiburg.de">http://www.avoss.uni-freiburg.de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Leibniz Universität Hannover</li> <li>» Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)</li> <li>» Forschungszentrum Jülich GmbH</li> <li>» Hydron Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH</li> <li>» BIT Ingenieure AG</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

In den vergangenen Jahren traten in Deutschland immer wieder Sturzfluten mit zum Teil verheerenden Auswirkungen auf, ausgelöst durch lokale Starkregenereignisse. Bestehende Warnwerkzeuge für Starkregen und deren Folgen beziehen sich aber nur auf die Vorhersage von Niederschlag und beachten nicht die aktuellen hydrologischen Verhältnisse. Doch sind gerade die hydrologischen Eigenschaften, wie die aktuelle Infiltrationskapazität der Böden und die Landbedeckung sowie geomorphologische Gebietscharakteristika, wie Gefälle oder Bodenbeschaffenheit, letztlich dafür entscheidend, ob ein Starkregen auch eine Sturzflut auslöst.

Eine belastbare Sturzflutwarnung muss daher neben den meteorologischen Faktoren auch die hydrologischen berücksichtigen. Ziel von AVOSS war daher die Entwicklung von Werkzeugen, um die Lücke im Warnsystem zu schließen. Dafür wurden prototypisch Warnungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen erprobt.

### Zentrale Ergebnisse

Zentrales Produkt des AVOSS-Projekts ist ein **Prototyp für eine regionale Sturzflutvorhersage** mittels eines **Sturzflutindex (SFI)**, welcher die aktuelle Sturzflutgefährdung für eine bestimmte

Region unter Berücksichtigung der meteorologischen Vorhersagen sowie der vorherrschenden hydrologischen und hydraulischen Bedingungen anzeigt. Die Vorhersage baut auf verschiedenen Teilen auf: eine **radarbasierte Niederschlagsvorhersage**, eine explizite **Modellierung der Oberflächenabflussbildung** sowie eine räumliche Akkumulation der berechneten Oberflächenabflüsse anhand der hydraulisch relevanten Begebenheiten. Die Klassifizierung der bestehenden Sturzflutgefährdung erfolgt schließlich anhand des Flächenanteils, auf dem die berechneten Überflutungstiefen bzw. Fließgeschwindigkeiten kritische Werte für die Sicherheit von Fußgänger:innen und Fahrzeugen überschreiten. Aufgrund der Recheneffizienz, insb. des in AVOSS entwickelten Verfahrens zur Akkumulation der Oberflächenabflüsse, ist eine großräumige SFI-Vorhersage möglich.

Daneben wurde in AVOSS für ausgewählte Pilotgemeinden eine **quasi-Echtzeit-Vorhersage von Überflutungsparametern** auf Häuser- bzw. Straßenebene unter Anwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN) geschaffen. Dies ermöglicht für ein aktuelles Starkregenereignis eine direkte punktgenaue Vorhersage der daraus resultierenden maximalen Überflutungshöhe und maximalen Fließgeschwindigkeit. In Kombination mit den

ebenfalls in AVOSS entwickelten **Schadensmodellen** für Sturzflutereignisse lassen sich diese Echtzeit-Überflutungsvorhersagen für die Pilotgebiete in Echtzeit-Vorhersagen zu den erwartenden Schäden erweitern.

Um die Entwicklungen aus AVOSS einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde ein webbasierter **AVOSS-Demonstrator** entwickelt, in dem für reale und synthetische Starkregenereignisse beispielhaft entsprechende SFI-Vorhersagen dargestellt sind. Weiterhin wurden für ausgewählte Pilotgebiete auch die konkreten, KNN-basierenden lokalen Überflutungsparameter und darauf aufbauende Schadensabschätzungen visualisiert.

Neben der Potenzialermittlung für konkrete Vorhersageprodukte liegt ein weiterer Schwerpunkt in AVOSS auf der **Identifizierung und Quantifizierung der Unsicherheiten**, die mit den Überflutungsvorhersagen einhergehen. Hierzu werden über einen Ensembleansatz die wichtigsten Unsicherheitsquellen entlang einer Echtzeit-Überflutungs- und Schadensvorhersage quantifiziert und vergleichend analysiert. Dies umfasst die Unsicherheiten der Niederschlagsvorhersage, nachfolgende Unsicherheiten in der hydrologischen und hydraulischen Modellierung sowie Unsicherheiten in der eigentlichen Schadensvorhersage.

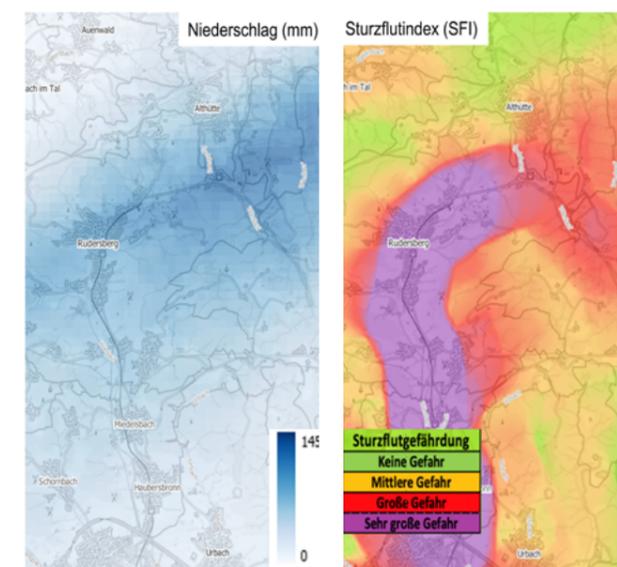


Abb.14 Beispiel für eine Vorhersage der aktuellen Sturzflutgefährdung basierend auf dem SFI für das Starkregenereignis von Anfang Juni 2024 im Einzugsgebiet der Wieslauf in Baden-Württemberg. (©AVOSS)

### Perspektiven für die Praxis

Um die prototypischen Produktentwicklungen möglichst praxisnah zu gestalten, wurden von Anfang an Praxisakteure aus der öffentlichen Verwaltung als assoziierte Partner einbezogen. Speziell die SFI-basierte Sturzflutvorhersage hat das Potenzial in eine bereits bestehende, operationelle Hochwasservorhersage mit eingebunden zu werden. Zwar lassen sich durch eine reine SFI-Vorhersage keine lokalen, punktgenauen Überflutungsvorhersagen ableiten, die Berücksichtigung der aktuellen hydrologischen und hydraulischen Begebenheiten in der SFI-Vorhersage stellen dennoch einen bedeutenden Mehrwert im Ereignisfall im Vergleich zu einer reinen Starkregenvorhersage dar.

Der SFI-Ansatz kann weiterhin dafür genutzt werden, um im Rahmen der allgemeinen Sturzflutvorsorge Gebiete zu ermitteln, die potentiell sturzflutgefährdet sind. Daraus ergibt sich, in welchen Regionen ein detailliertes Starkregenrisikomanagement (SRRM) besonders wichtig wäre.

Sollte für eine Kommune bereits ein detailliertes SRRM vorliegen, so kann die aktuelle SFI-Vorhersage mit bestehenden SRRM-Szenarien verknüpft werden. In diesem Fall lassen sich aus den SFI-Vorhersagen direkt konkrete Handlungsempfehlungen ableiten.

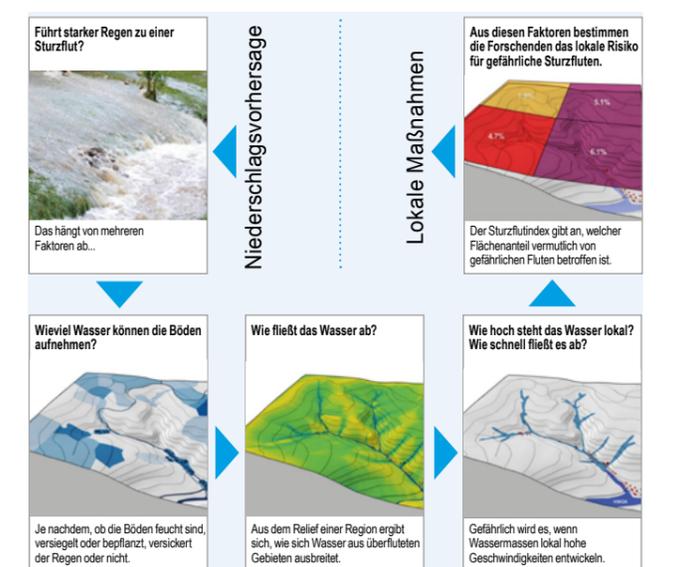


Abb.15 Schematischer Ablauf der Sturzflutvorhersage basierend auf dem SFI. (©AVOSS)

## INNOVATIVE INSTRUMENTE ZUM MANAGEMENT DES URBANEN STARKREGENRISIKOS

Das Verbundprojekt Inno\_MAUS entwickelt digitale Instrumente zum ganzheitlichen Umgang mit Starkregenrisiken in Städten für die Kommunen. Dies umfasst Tools zur Echtzeitvorhersage und Szenarioanalysen von Starkregenereignissen, zur Abflussbildung und -konzentration sowie zur Risikoanalyse.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.07.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr.-Ing. Axel Bronstert, Universität Potsdam <a href="mailto:axel.bronstert@uni-potsdam.de">axel.bronstert@uni-potsdam.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="http://www.uni-potsdam.de/de/inno-maus">www.uni-potsdam.de/de/inno-maus</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Universität Potsdam, Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie</li> <li>» Universität Potsdam, Lehrstuhl Geographie und Naturrisikenforschung</li> <li>» TU München, Lehrstuhl Wasserbau und Wasserwirtschaft</li> <li>» TU München, Lehrstuhl Datenwissenschaft in der Erdbeobachtung</li> <li>» KISTERS AG</li> <li>» Mapular UG</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Die Folgen von Starkregen sind für Städte in ganz Deutschland eine potenzielle Gefahr. Für ein ganzheitliches Starkregenrisikomanagement müssen zahlreiche Komponenten zusammenwirken: quantitative und hochaufgelöste Analysen über das Gefährdungspotenzial eines Gebietes, modellbasierte Vorhersagen und Frühwarnung, zielgruppenspezifische Risikokommunikation, aber auch bauliche Maßnahmen. Die Umsetzung dieses Konzepts erweist sich in der Praxis als schwierig, da effiziente, skalierbare und übertragbare Instrumente sowie Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Komponenten meist fehlen.

Das Verbundprojekt Inno\_MAUS verfolgt das Ziel, innovative digitale Instrumente, die sich flexibel in existierende kommunale Abläufe und Dateninfrastrukturen integrieren lassen, weiterzuentwickeln und für Kommunen bereitzustellen. Dabei erforschen die Projektbeteiligten auch das Potenzial von KI-Methoden für eine verbesserte und schnellere Vorhersage und der Kopplung einzelner Instrumente in einer operationellen Plattform. Erprobt werden die Instrumente in Zusammenarbeit mit kommunalen Akteuren in den Pilotstädten Berlin und Würzburg.

### Zentrale Ergebnisse

#### » Starkregenvorhersage:

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Deep Learning Modell RainNet2024-S ermöglicht,

basierend auf Radardaten des Deutschen Wetterdienstes, die Überschreitung impaktrelevanter Niederschlagsmengen vorherzusagen. Die Vorhersagegenauigkeit von „RainNet2024-S“ übertrifft dabei bisher genutzte Modelle, wenngleich die Genauigkeit erwartungsgemäß mit zunehmendem Niederschlag abnimmt.

#### » Urbaner Rückhalt durch Grüne Infrastruktur:

Der Einfluss Grüner Infrastruktur auf die Abflussbildung im Berliner Untersuchungsgebiet wurde mit dem Storm Water Management Model (SWMM) modelliert. Dabei wurden z. B. Szenarien zum erweiterten Wasserrückhalt mit Gründächern und Rigolen betrachtet. Es zeigte sich, dass ein stark ausgeprägter Einsatz von Grüner Infrastruktur den Gebietsrückhalt deutlich verbessern kann, insbesondere durch die Kombination unterschiedlicher Typen von Grüner Infrastruktur. Der relative Wasserrückhalt hängt von der Stärke des betrachteten Regenereignisses ab. Weiterhin wurde mit dem Webtool Urban\_Wa\_Ret (<http://urban-wa-ret.umwelt.uni-potsdam.de>) ein Instrument zur schnellen Abschätzung und Demonstration des Effekts von Grüner Infrastruktur in einem vereinfachten Untersuchungsgebiet bereitgestellt.

#### » Beschleunigung der hydraulischen Modellierung durch Machine Learning:

Das Modell UrbanFloodCast wurde entwickelt, um Abflusskonzentrationen deutlich schneller zu

berechnen als herkömmliche hydraulische Modelle. Mit Hilfe eines Deep Neural Operator Ansatzes können Überflutungshöhen in Echtzeit vorhergesagt werden – ein wichtiger Fortschritt für Anwendungen in der Hochwasserwarnung. Darüber hinaus wurde das Modell speichereffizient konzipiert, was eine bessere Anpassung an praktische Anwendungen ermöglicht. Verglichen mit einer 2D-hydrodynamischen numerischen Lösung simuliert dieses Modell die Überflutungshöhen um Größenordnungen schneller.

#### » Schäden an Gebäuden und Verkehrsinfrastruktur:

Gebäudeschäden wurden mit dem auf der Grundlage von Haushaltsbefragungen entwickelten Flood Damage Estimation Tool (FloodEsT) modelliert. Mit Hilfe von maschinellem Lernen kann der potenzielle Schaden an Gebäuden, in Abhängigkeit von der Überflutungshöhe und Fließgeschwindigkeit sowie gebäudespezifischen Parametern, einer Schadensklasse zugeordnet werden.

Zur Analyse der Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur wurde ein Index entwickelt, der folgende Faktoren berücksichtigt: Überflutungsdauer, Fließgeschwindigkeit, maximale Wassertiefe sowie die Geschwindigkeit, mit der das Hochwasser bestimmte Gebiete erreicht. Zusätzlich wird die Erreichbarkeit der Kritischen Infrastruktur untersucht, da diese im Katastrophenfall eine entscheidende Rolle für Rettungsmaßnahmen spielt.

» **Operationale Kopplung der digitalen Modelle:** Die entwickelten Modelle und Werkzeuge wurden in das übergreifende Daten- und Modellmanagementsystem WISKI-Web eingebunden und gekoppelt. Auf diese Weise können alle Schritte der Starkregenrisikobewertung – von der Starkregenvorhersage bis zur Schadensabschätzung – operationell und in Echtzeit von kommunalen Mitarbeiter:innen ausgeführt werden.

### Perspektiven für die Praxis

» **Übertragbarkeit:** Durch die überwiegende Nutzung frei verfügbarer Daten können die Modelle und Werkzeuge auch auf andere Städte angewendet werden.

» **Modularität:** Die entwickelten Modelle und Werkzeuge können einzeln, je nach Bedarf, in bereits bestehende Abläufe integriert werden.

» **Integrationsplattform:** Im WISKI-Web werden die einzelnen Modelle gekoppelt und Ergebnisse dargestellt und Warnungen für frei wählbare Alarmstufen können versendet werden. Es wurden zwei Modi entwickelt:

- **Echtzeit-Analyse:** Hier wird die Modellkette von Radar-Niederschlagsdaten angetrieben, so dass möglichst schnell die Gefährdung von Gebäuden und Verkehrsinfrastruktur abgeschätzt werden kann.
- **Szenarien-Modus:** Hier können vergangene Niederschlagsereignisse oder Maßnahmen zum Risikomanagement analysiert werden.

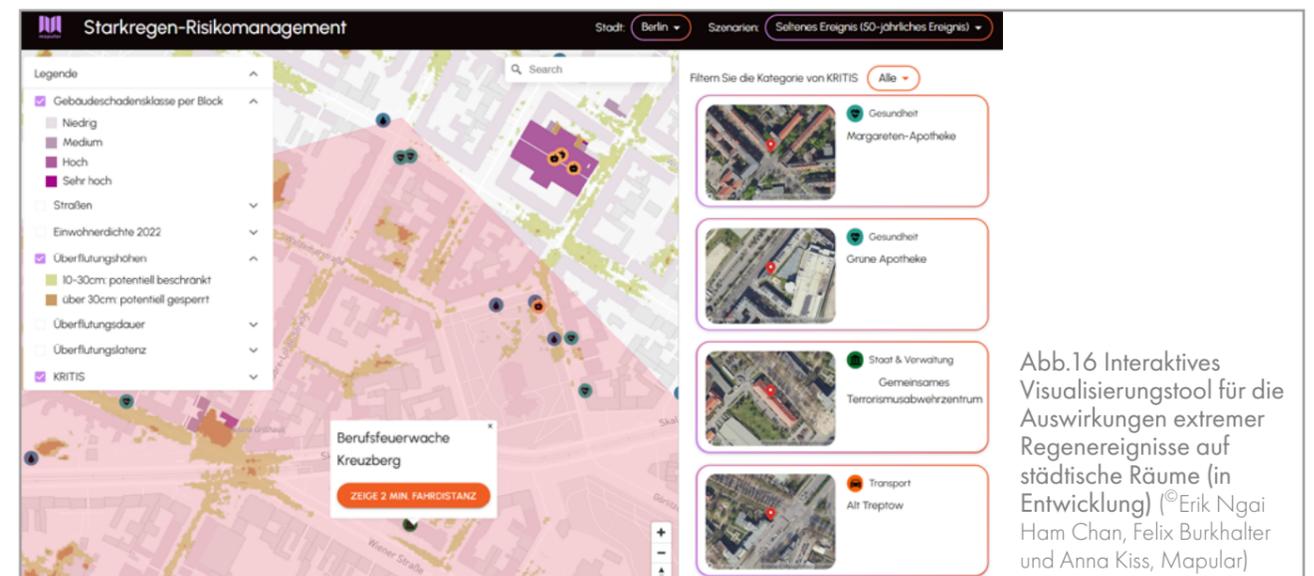


Abb.16 Interaktives Visualisierungstool für die Auswirkungen extremer Regenereignisse auf städtische Räume (in Entwicklung) ©Erik Ngai Ham Chan, Felix Burkhalter und Anna Kiss, Mapular)

## URBAN FLOOD RESILIENCE – SMART TOOLS

Die FloReST Smart Tools erlauben eine Steigerung der Resilienz urbaner Infrastrukturen gegenüber Starkregenereignisse. Eine elementare Rolle spielte dabei die Ausweisung von Notabflusswegen auf der Grundlage innovativer, technologiebasierter Lösungen zur hochaufgelösten Fließwegermittlung. Ein zweiter Schwerpunkt des Projekts war die Erarbeitung von Tools zur Risikokommunikation für die Starkregenvorsorge.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2022 - 30.04.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr.-Ing. Lothar Kirschbauer, Hochschule Koblenz <a href="mailto:florest@hs-koblenz.de">florest@hs-koblenz.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen/forschung-projekte/laufende-projekte/florest-urban-flood-resilience-smart-tools/florest-urban-flood-resilience-smart-tools">https://www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen/forschung-projekte/laufende-projekte/florest-urban-flood-resilience-smart-tools/florest-urban-flood-resilience-smart-tools</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI)</li> <li>» Disy Informationssysteme GmbH</li> <li>» Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Institut für Softwaresysteme (ISS)</li> <li>» Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH</li> <li>» Universität Trier, Raum- und Umweltwissenschaften, Fach Hydrologie</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Bei Starkregenereignissen müssen die Wassermassen möglichst schadlos durch Siedlungsgebiete abgeleitet werden – über Notabflusswege als Element der wassersensiblen Stadtentwicklung wird dies möglich. Da selbst kleinste Strukturen eine wasserlenkende Wirkung haben können, ist eine hochaufgelöste Abbildung der Oberflächenstrukturen zur präzisen Notabflusswegausweisung essenziell. Die FloReST Smart Tools erlauben sowohl eine detaillierte Fließwegermittlung als auch eine Ergänzung der Datengrundlage durch Beiträge der örtlichen Bevölkerung zu Starkregen mithilfe von Citizen Science Ansätzen.

Der Einsatz und die Entwicklung innovativer Technologien liefern dabei entscheidungsunterstützende Informationen und Erkenntnisse zu Risikoelementen der urbanen Infrastruktur. Digitale Informationen über Gefahren und Risiken, die aus Wasser-Extremereignissen resultieren, werden zur Verfügung gestellt sowie die Ergebnisse der einzelnen Smart Tools für verschiedene Nutzergruppen über eine innovative Plattform – ein GeoDataWarehouse – bereitgestellt.

### Zentrale Ergebnisse

Konventionelle **2-dimensionale hydrodynamische Modelle** wurden verfeinert und Fließweganalysen

auf Digitalen Geländemodellen (DGM) mit einer regelmäßigen Rasterweite von 1 m (DGM1), 0,5 m (DGM0,5) und 0,25 m (DGM0,25) durchgeführt. Je höher die Auflösung des DGMs, desto detaillierter werden die Oberflächenstrukturen des Geländes abgebildet, sodass Fließwege sowie Wassertiefen realitätsnaher simuliert werden können. Dennoch konnten auch mit einem DGM0,25 nicht alle abflussrelevanten Strukturen wie z. B. Bordsteine erfasst werden. Eine lokale Betrachtung der örtlichen Gegebenheiten und Verifizierung der Simulationsergebnisse ist somit obligatorisch für eine hochaufgelöste Fließwegausweisung. Dies kann z. B. durch eine **mobile Kartierung** erfolgen. Dazu wurde eine Verfahrensroutine entwickelt, mit der über eine mobile Videokamera und einen GPS-Empfänger Straßenzüge abgegangen werden und eine detaillierte Aufnahme der örtlichen Oberflächenstrukturen erfolgt. Eine Überlagerung der Aufnahmen mit ermittelten Fließwegen aus z. B. Sturzflutgefahrenkarten kann somit als Teil der Grundlage zur Maßnahmenplanung verwendet werden

Eine innovative Ergänzung zur präzisen Fließwegbestimmung stellt die **berührungslose Fließwegkartierung durch Dotierversuche** dar. Dazu wird Wasser als Temperaturtracer auf die Geländeoberfläche gegeben und der Wasserabfluss mittels eines mit Thermalsensor ausgestatteten Droh-

nensystems verfolgt. Die Methodik erlaubt eine kleinräumige und präzise Erfassung realer Fließwege.

**Deep-Learning Modelle** ergänzen die Methoden, um Überflutungsvorhersagen in kürzester Zeit auf Grundlage variierender räumlicher Informationen zu erlangen. Auf Basis eines DGM1 sind sekundenschnelle Überflutungssimulationen für definierte Starkregenereignisse möglich. Des Weiteren können Anpassungen in den Geländestrukturen z. B. durch Mauern betrachtet werden. Die Optimierung der räumlichen Übertragbarkeit der Modelle bedarf jedoch noch weiterer Forschung.

Zur Nutzung von **Citizen Science** wurde eine **SmartApp** entwickelt, um das Wissen der lokalen Bevölkerung zu abflussrelevanten Problemstellungen zu erfassen. Die dort erfassten Meldungen dienen zum einen dazu, die lokalen Akteure der Starkregenvorsorge in der Umsetzung entsprechender Maßnahmen zu unterstützen und wertvolle Informationen zu örtlichen Gegebenheiten zu erfassen. Zum anderen wird die Bevölkerung zum aktiven Handeln motiviert und ein Bewusstsein für Starkregengefahren und Problemstellen geschaffen.

Das **GeoDataWarehouse** erlaubt als zentrale Datenplattform eine themenspezifische Bündelung und Harmonisierung der erzeugten und frei

verfügbaren Datensätze, sodass Synergien geschaffen und Informationen benutzerspezifisch zur Verfügung gestellt werden können.

### Perspektiven für die Praxis

Mit den FloReST Smart Tools kann die lokale Starkregenvorsorge erheblich verbessert werden, indem mithilfe der unterschiedlichen Methoden eine hochaufgelöste, präzise Datengrundlage geschaffen wird. Anhand dieser können konkrete Handlungserfordernisse und -empfehlungen zur Verbesserung der Resilienz urbaner Infrastrukturen abgeleitet werden. Die Tools zur präzisen Fließwegermittlung richten sich primär an Kommunen, Fachplaner:innen und Ingenieurbüros, um Notabflusswege zielgerichtet auszuweisen.

Indem die Bevölkerung in den Prozess der Starkregenvorsorge eingebunden wird (z. B. durch die SmartApp), kann wertvolles Wissen zu lokalen Problemstellen erfasst und in der weiteren Maßnahmenplanung berücksichtigt werden. Zugleich wird die Akzeptanz für die Umsetzung von Maßnahmen gesteigert. Verschiedene spielerische Tools ermöglichen es zudem, die breite Öffentlichkeit einzubeziehen, sodass bereits junge Menschen – etwa in Schulen – mit den potentiellen Gefahren von Starkregen konfrontiert und für das Thema sensibilisiert werden und dadurch als Multiplikator:innen dienen können.

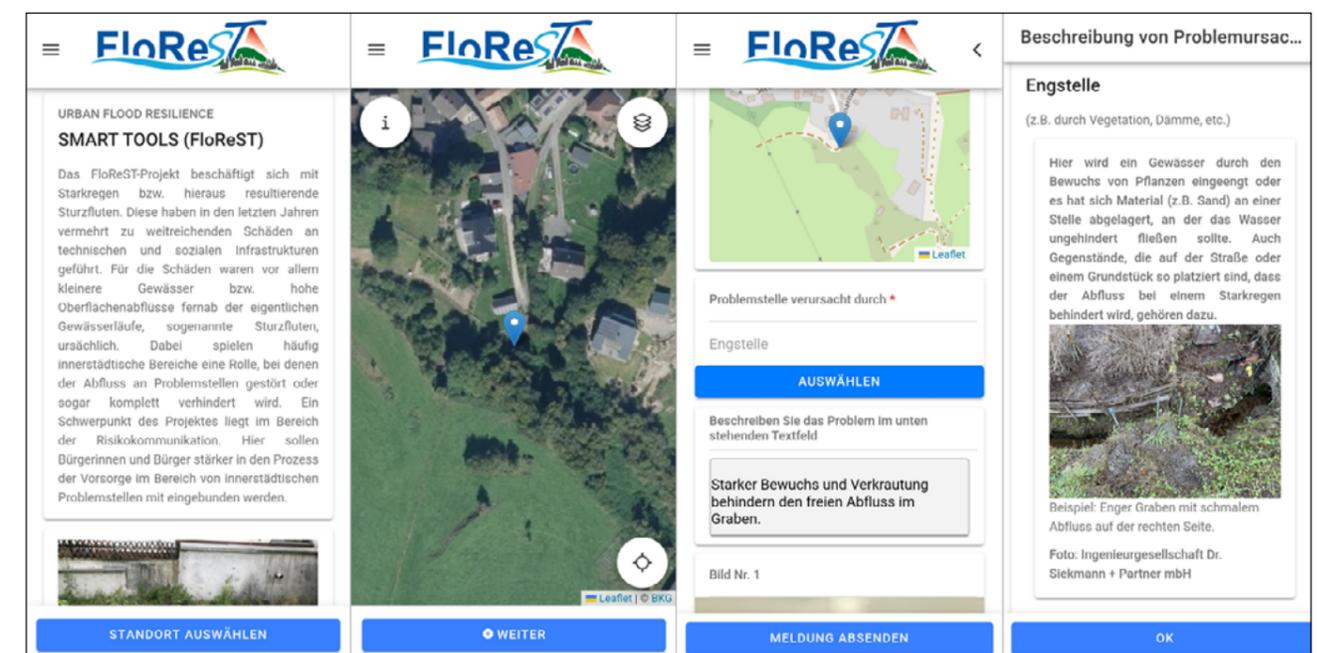


Abb.17 Startansicht und Meldungsseite der FloReST SmartApp (©Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld)

## ANPASSUNG DES MANAGEMENTS VON REGENWASSER AN EXTREMEREIGNISSE

Das Projekt AMAREX untersuchte und bewertete Potenziale und Anpassungsmöglichkeiten von Anlagen des urbanen Regenwassermanagements an die Wasserextreme Starkregen und Dürre. Zusätzlich wurde die urbane Wasserbilanz als Bewertungsindikator für diese Anpassung untersucht und ein kommunales Anwendungswetool entwickelt.

<b>Laufzeit:</b>	01.02.2021 - 31.07.2025
<b>Koordinator:</b>	Prof. Dr. Ulrich Dittmer, RPTU Kaiserslautern-Landau <a href="mailto:ulrich.dittmer@rptu.de">ulrich.dittmer@rptu.de</a>
<b>Webseite:</b>	<a href="https://www.amarex-projekt.de/de">https://www.amarex-projekt.de/de</a>
<b>Verbundpartner:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>» Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Abteilung Multiskalige Umweltverfahrenstechnik</li> <li>» Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH</li> <li>» Berliner Wasserbetriebe, AöR</li> <li>» Ecologic Institut gGmbH</li> <li>» Technologiestiftung Berlin</li> <li>» HELIX Pflanzensysteme GmbH, Kornwestheim</li> <li>» Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR (StEB)</li> </ul>

### Hintergrund und Ziele

Die Auswirkungen von Wasserextremen sind besonders in Städten deutlich spürbar. Übergeordnete Zielsetzung von AMAREX war daher die Entwicklung von Methoden, die eine Anpassung von Regenwasserbewirtschaftungs(RWB)-Konzepten an die Extremereignisse Starkregen und Dürre auf kommunaler Ebene unterstützen. Hierzu wurden RWB-Maßnahmen, etwa Versickerungsanlagen oder Gründächer, um zusätzliche Speicherräume zur Überflutungsvorsorge bzw. zur Bewässerungsnutzung als Dürrevorsorge funktional erweitert und ihre Anwendungspotenziale und Effekte bewertet. Ferner wurde überprüft, wie gut die urbane Wasserbilanz den Anpassungsstatus einer Kommune an die beiden Wasserextreme abbildet. AMAREX entwickelte zudem sozio-ökonomische Bewertungsmethoden für die Umsetzungspotenziale und Wirkungsquantifizierung dieser Maßnahmen.

Die wesentlichen Ergebnisse wurden in ein Planungstool für die kommunale Praxis und die Öffentlichkeitsarbeit überführt. Das Tool wurde zusammen mit den Partnerstädten Köln und Berlin entwickelt und soll einen sektorenübergreifenden Planungsprozess zwischen Stadt-, Freiraum- und Infrastrukturplanung unterstützen.

### Zentrale Ergebnisse

Die Forschungsarbeiten in AMAREX zu den Anpassungspotenzialen von blau-grünen Infrastrukturen und RWB-Maßnahmen an Wasserextreme waren eng mit den kommunalen Planungserfordernissen verzahnt und mündeten in ein **webbasiertes Planungstool**. Hierfür wurden in einem dreistufigen Stakeholderprozess mit den Städten Berlin und Köln Planungsbedarfe und Nutzungsanforderungen identifiziert.

Zur **Anpassung von RWB-Maßnahmen an Wasserextreme** wurde ein **Maßnahmenkatalog** für RWB+ Anlagen (Starkregenvorsorge) und RWB-N Anlagen (Trockenheitsvorsorge) mit insgesamt acht Anlagenkategorien ausgearbeitet.

Die **Minderungseffekte** von RWB+ Anlagen auf **Starkregenüberflutungen** wurden durch gekoppelte 1D/2D-Simulation eines Berliner Pilotgebiets untersucht und daraus allgemein anwendbare Wirkungskurven für ausgewählte RWB+ Anlagen entwickelt. Diese wurden anschließend an einem weiteren Pilotgebiet validiert.

Die Auswirkungen der RWB+ und RWB-N Anlagen auf den Wasserhaushalt sowie die Wassernutzungspotenziale von RWB-N Anlagen wurden umfassend modellbasiert quantifiziert.

Zur **Trockenheitsvorsorge** wurden in Köln vier Pilotgebiete und ein Anwendungsfall mit unterschiedlichen Ausgangssituationen hinsichtlich der Planungsrandbedingungen und des Bewässerungsbedarfs für urbanes Grün analysiert. Für die Pilotgebiete wurden verschiedene Regenwassernutzungskonzepte mit den jeweils erforderlichen Speichervolumina und Bewässerungsmodellen modelliert. Das hierfür entwickelte EASB-Modell (Erfassung-Aufbereitung-Speicherung-Bereitstellung) unterstützte die **Entwicklung von Nutzungsstrategien**. Parallel dazu wurden Feldversuche zur Erhaltungs- bzw. Optimalbewässerung von Fassadengrün (Efeu) durchgeführt. Hierfür wurde Regenwasser verschiedener Herkunftsflächen nach Speicherung in Retentionszisternen genutzt, woraus u. a. Erkenntnisse zur Qualität und Quantität von Regenwasserabflüssen gewonnen wurden.

Mit der **Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells ABIMO** für Berlin und dessen Übertragung auf Köln lassen sich Wasserbilanzbetrachtungen mit und ohne RWB-Anlagen für Stadtquartiere bzw. Blockteilflächen als Aggregationsebene durchführen. Das Modell steht zum Projektende als freier Download open-source zur Verfügung. Seine Kernfunktionalitäten werden zudem im AMAREX Planungstool beispielhaft umgesetzt und nutzbar sein. Weiterer Bestandteil des Webtools sind Flächenpotenzialkarten für ausgewählte RWB-Anlagen, die die Umsetzungsmöglichkeiten aus rechtlicher, technischer und planerischer Sicht aufzeigen.

Um blau-grüne Infrastrukturen bzw. RWB+/RWB-N Anlagen sozio-ökonomisch zu bewerten, wurde ein **Wirkungsgefüge als Systemanalyse** zur

**städtischen Regenwasserbewirtschaftung** entwickelt. Kern des Bewertungsansatzes ist eine Multi-Kriterien-Analyse für RWB+/RWB-N Anlagen aus insgesamt 18 wasserbezogenen, ökonomischen und sozialen Kriterien. Zur Monetarisierung von ausgewählten Nutzeneffekten der RWB+/RWB-N Anlagen werden u. a. Modellierungsergebnisse zur Wasserspeicherung und Regenwasserinfiltration herangezogen.

### Perspektiven für die Praxis

Die wesentlichen Verwertungsperspektiven für die Praxis liegen in der Bereitstellung eines prototypischen webbasierten Planungstools, mit dem Umsetzungs- und Wirkungspotenziale von RWB, RWB+ und RWB-N Maßnahmen abgeschätzt und bewertet werden können. Die Abschätzungen beziehen sich auf Anpassungseffekte an Wasserextreme (Starkregen, Trockenheit) sowie auf die Annäherung an eine naturnahe Wasserbilanz durch die Effekte blau-grüner Infrastrukturen. Einige Untersuchungen sind nicht unmittelbar in das Webtool integrierbar und werden daher über separate MS-Excel-Tools als Download bereitgestellt. Dies betrifft die Wirkungsermittlung von RWB+-Anlagen (Überflutungsvorsorge), die Ermittlung des Bewässerungsbedarfs und der Speichergröße bei RWB-N Anlagen (Trockenheitsvorsorge) sowie die sozio-ökonomische Maßnahmenbewertung.

Das AMAREX Webtool zeigt prototypisch die Möglichkeiten eines frei über Webbrowser zugänglichen Planungstools auf. Es kann als open-source Plattform von Kommunen für eigene lokale Randbedingungen, Datenverfügbarkeiten und Bedarf weiterentwickelt werden.

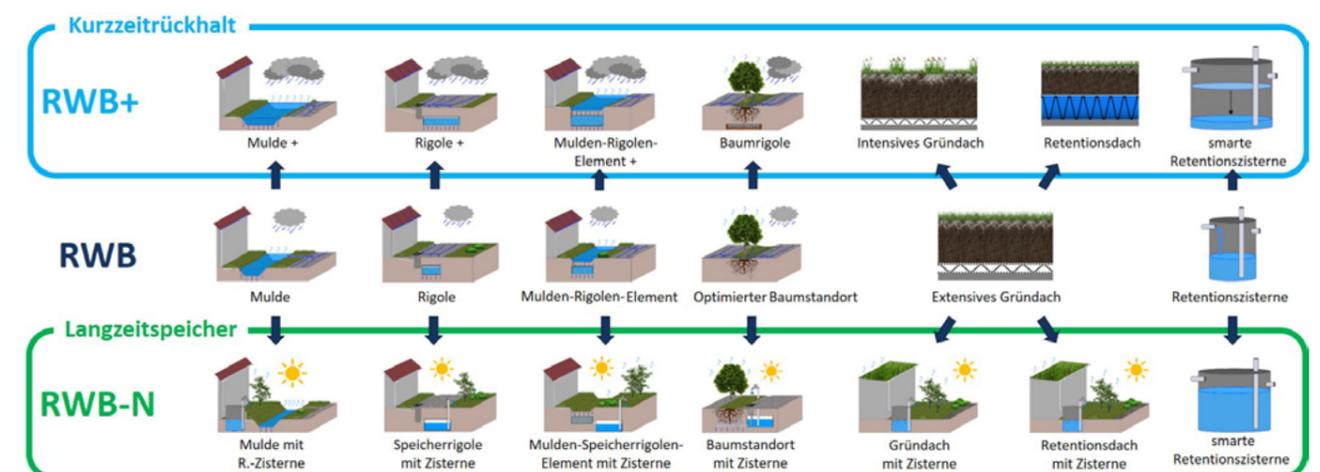


Abb.18 Funktionale Anpassung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung (RWB) an die Wasserextreme Starkregen (RWB+) und Trockenheit (RWB-N) (©RPTU Kaiserslautern-Landau)

**ERGEBNISSE DER ARBEITSGRUPPEN ZU VIER  
VERBUNDÜBERGREIFENDEN QUERSCHNITTSTHEMEN**

Zwischen den zwölf WaX-Verbundvorhaben existieren zahlreiche Berührungspunkte und Fragestellungen von projektübergreifendem Interesse. Um Synergien zwischen den Forschungsarbeiten herzustellen und eine Vernetzung und einen Austausch zu fördern, fanden im Laufe der vergangenen drei Jahre regelmäßig Aktivitäten zu solchen Querschnittsthemen statt. Diese Themen wurden am Anfang der Förderung von den Verbundprojekten und dem Lenkungskreis (s. Infobox S. 36) identifiziert. Das Ziel der Querschnittsthemen bestand in einer vertieften Vernetzung, die den Austausch von Ideen, Informationen, Daten und Methoden erleichterte.

Neben den drei anfänglichen Themen (1) *Kommunikation und Partizipation*, (2) *Praxistransfer* und (3) *Wasserspeicherung in der Landschaft* wurde auf der dritten Lenkungskreissitzung im April 2023 das Thema (4) *Modellierungen und Methoden aus der Informatik als viertes Querschnittsthema* etabliert. Die Querschnittsthemen wurden von sogenannten Kümmerern betreut und starteten im Frühjahr 2023 mit ersten Workshops und der Bildung von Arbeitsgruppen. Zu Beginn der Förder-

maßnahme führte das Vernetzungsvorhaben zudem in den Verbänden eine Online-Umfrage zu den Themen Definition von Kernbegriffen, Nutzung und Beschaffung von (Geo)Daten und Berücksichtigung von Klimaänderungsszenarien durch, um ein gegenseitiges Verständnis von Begriffen und Konzepten zu schaffen. Das Vernetzungsvorhaben unterstützte darüber hinaus die Kümmerer bei der Organisation, Durchführung und inhaltlichen Vor- und Nachbereitung der zahlreichen Workshops und Aktivitäten zu den Querschnittsthemen. In den Arbeitsgruppen konnten sich die Mitarbeitenden untereinander austauschen und Herausforderungen und Lösungsansätze gemeinsam diskutieren. Die Diskussionen gaben weiterhin wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung von bestimmten Themen und Ansätzen in den Arbeitsgruppen. So wurde z. B. eine Best-Practice-Sammlung zu Maßnahmen der Wasserspeicherung erstellt und eine weitergehende Studie zum Thema Praxistransfer initiiert. Die interdisziplinären und projektübergreifenden Austauschformate unterstützen damit die wissenschaftliche Qualität und Wirkung der Fördermaßnahme erheblich.

**Übersicht der Querschnittsthemen und Kümmerer:**

**Kommunikation und Partizipation:**  
Dr. Mario Sommerhäuser, Lippeverband  
Dr. Nicolai Bätz, Lippeverband

**Praxistransfer:**  
Prof. Günter Müller-Czygan, Hochschule Hof

**Wasserspeicherung in der Landschaft:**  
Prof. Dr. Axel Bronstert, Universität Potsdam  
Prof. Dr. Irina Engelhardt, Technische Universität Berlin

**Methoden und Modellierungen aus der Informatik:**  
Prof. Dr. Sándor Fekete, Technische Universität Braunschweig

**Kommunikation und Partizipation in Forschungsprojekten**  
Kommunikation und Partizipation sind zentrale Bestandteile von Forschungsprojekten und entscheidend für die **Verwertung und Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen**. Wie kann es zum Beispiel gelingen durch Risikokommunikation, das **Risikobewusstsein für Wasserextreme** langfristig wach zu halten und die **Bevölkerung nachhaltig** dafür zu **sensibilisieren**? Im Querschnittsthema „**Kommunikation und Partizipation**“ haben die Mitarbeiten-

den der Fördermaßnahme WaX in regelmäßigen Workshops ihre bisherigen Erfahrungen und bewährten Praktiken, sowie Herausforderungen im Bereich Kommunikation und Partizipation vorgestellt und diskutiert. So wurde eine Plattform geboten, um von den unterschiedlichen Herangehensweisen und Herausforderungen zu lernen und gemeinsam Lösungen zu entwickeln. Zunächst wurden die Ziele, Zielgruppen sowie Formate und geplante Aktivitäten der Projekte im Bereich Kommunikation und Partizipation erfasst und diskutiert (Abb. 19).

In den darauffolgenden Workshops wurden die verschiedenen Aspekte, insbesondere zu den beiden Themenfeldern Partizipation und Risikokommunikation, weiter vertieft. Durch Impulsvorträge und einen Austausch von Erfahrungen gewannen die Projekte wertvolle Erkenntnisse für die eigene Projektarbeit. Die gesammelten Erkenntnisse aus dem Querschnittsthema lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- » Anforderungen, Vorbehalte und Konfliktpotenziale der Zielgruppen können durch erfolgreiche und zielgruppenspezifisch Kommunikations- und Partizipationsformate berücksichtigt werden. Dies trägt zur **Akzeptanz und Wirksamkeit von Maßnahmen** bei. Im Vorfeld ist eine sorgfältige **Akteurs- und Bedarfsanalyse** sinnvoll. Eine Netzwerkanalyse zu bestehenden Strukturen liefert wichtige Hinweise für die Entwicklung von Risikomanagementstrategien.
- » **Erfolgsfaktoren bei Beteiligungsformaten**, wie Stakeholder-Workshops oder Citizen Science, sind z. B. die Einbindung von lokalen Partnern, die Möglichkeit zur Mitbestimmung und Entwicklung gemeinsamer Ziele, ein gutes Erwartungsmanagement und ein lösungsorientierter Umgang mit Interessenskonflikten.

» Verschiedene Zielgruppen erfordern **unterschiedliche Kommunikationsstrategien und -formate**. Klassische Medien sind für die breite Bevölkerung zielführend, während sich für junge Menschen und Schulklassen spielerische und innovative Formate, wie Serious Games oder Augmented Reality anbieten.

» **Innovative, aktivierende und zielgruppengerechte Formate** tragen zu einer Sensibilisierung gegenüber Wasserextremen bei. In der Kombination mit konkreten Handlungsempfehlungen können diese langfristig Verhaltensänderungen fördern. Dies sollte auch in der (Schul-)Bildung stärker integriert werden. Gelegenheitsfenster, wie z. B. beim Grundstückskauf, sollten genutzt werden.

Die Ergebnisse aus dem Querschnittsthema wurden in einem Abschlussbericht zusammengefasst (<https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/Abschlussbericht-Querschnittsthema-Kommunikation-Partizipation.pdf>). Neben den Erkenntnissen zu Partizipation und Risikokommunikation finden sich dort auch anschauliche Beispiele aus den Verbundprojekten, darunter Beteiligungsformate und das Beispiel eines Augmented Reality Sandkastens zur Risikokommunikation.

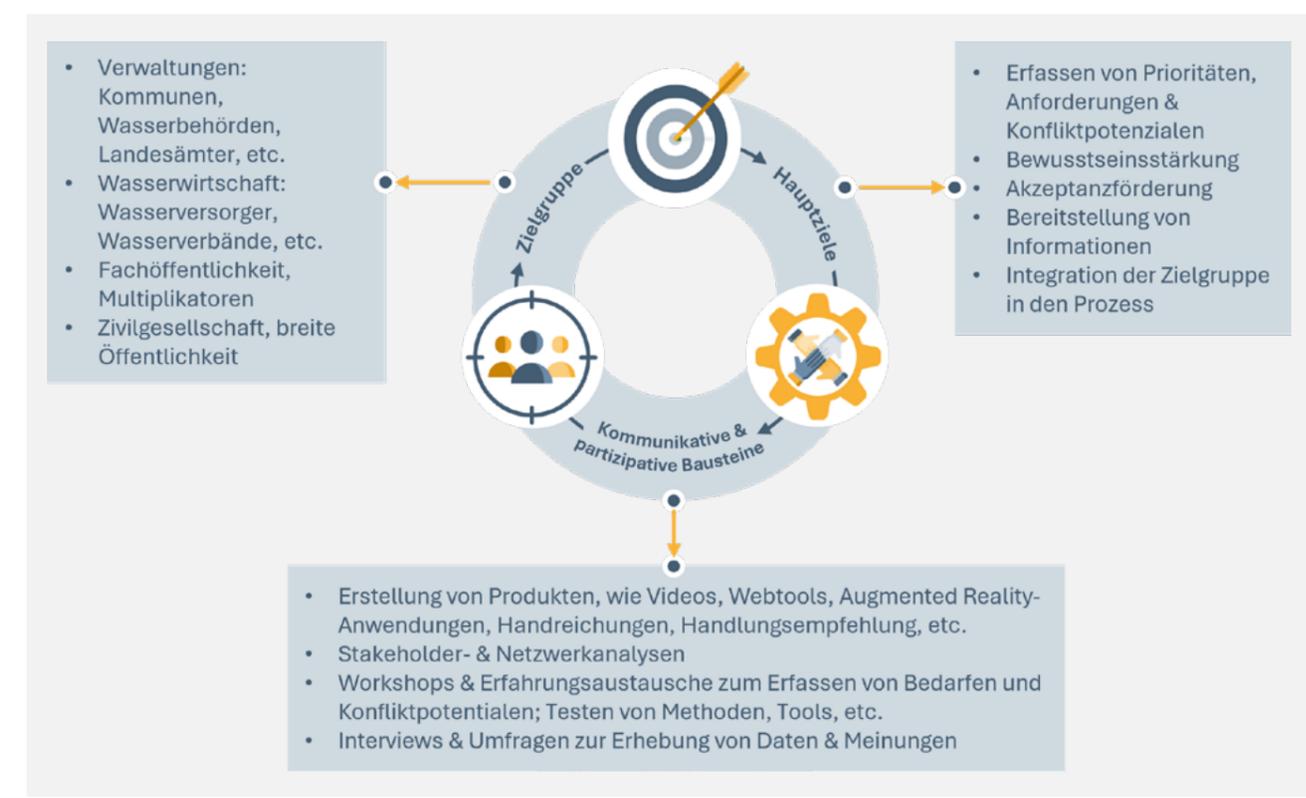


Abb.19 Ziele, Zielgruppen und Formate für Kommunikation und Partizipation in der Fördermaßnahme WaX



## Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die Praxis

Die Erkenntnisse des Querschnittsthemas „Kommunikation und Partizipation“ schließen nahtlos an die zentralen Aspekte des zweiten Querschnittsthemas „**Praxistransfer**“ an bzw. sind wichtige Bestandteile eines erfolgreichen Transfers von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die Praxis. Das Querschnittsthema Praxistransfer geht jedoch noch einen Schritt weiter und betrachtet Praxistransfer nicht als Ziel oder Methode, sondern als **partizipativen Prozess**, der bereits mit der Entwicklung einer Forschungsidee beginnt. Erreicht werden sollen damit eine **bessere Passfähigkeit** der Forschung mit den tatsächlichen Bedarfen der Praxis und eine **höhere Akzeptanz von Maßnahmen** bei den beteiligten Partnern, und damit auch der erfolgreiche Transfer der Forschungsergebnisse in die Umsetzung.

Zu dem Thema fanden zunächst zwei Workshops statt, bei denen sich die Teilnehmenden zu ihren bisherigen Erfahrungen austauschen konnten. Darüber hinaus wurden verschiedene Methoden zum Praxistransfer der Hochschule Hof vorgestellt, die im Projekt InSchuKa4.0 angewandt werden.

Es wurde unter anderem der Aspekt diskutiert, wie der Effekt von erfolgreich etablierten Pilotanwendungen mit Leuchtturmcharakter genutzt werden kann, um einen breiteren Praxistransfer zu erreichen.

Um den Erfolg des Praxistransfers innerhalb von WaX systematisch zu evaluieren und potenzielle Hürden sowie förderliche Rahmenbedingungen zu identifizieren, wurden im Herbst 2024 vom Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Über **leitfadengestützte Interviews** berichteten zunächst die externen Mitglieder des WaX-Lenkungskreises sowie beteiligte Praxispartner (Unternehmen) der WaX-Forschungsverbände über ihre Erfahrungen und Einschätzungen zum Praxistransferprozess. Hierzu wurden aus jedem Verbundvorhaben einzelne Unternehmen ausgewählt, sodass eine repräsentative Abdeckung der beteiligten Unternehmensgrößen und -branchen erzielt wurde. Im Anschluss wurden per Interviews und Online-Umfrage potenzielle Anwender:innen zu ihren Erwartungen befragt. Die Ergebnisse wurden strukturiert ausgewertet und Empfehlungen zur Verbesserung des Praxistransfers abgeleitet.

### Inspirierender Austausch und produktive Diskussionen im WaX-Lenkungskreis

Die verbundübergreifenden Aktivitäten in WaX wurden regelmäßig in Lenkungskreissitzungen diskutiert und weiterentwickelt. Der Lenkungskreis unterstützte die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Fördermaßnahme WaX und setzte sich aus den Koordinatorinnen und Koordinatoren der Verbundvorhaben sowie fünf externen Mitgliedern aus verschiedenen Anwendungsbereichen der Wasserwirtschaft zusammen. Als Gäste waren das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), der Projektträger Karlsruhe sowie das Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net vertreten. Die Treffen unterstützten den Austausch zwischen den Verbundprojekten und ermöglichten die Identifizierung von Schnittstellen zu anderen Projekten und Initiativen. Dieser interdisziplinäre und projektübergreifende Austausch hat die wissenschaftliche Qualität und den Praxistransfer von Ergebnissen der Fördermaßnahme gestärkt. Die externen Lenkungskreismitglieder stellten dabei die Anschlussfähigkeit und Kohärenz von aktuell diskutierten Themen in verwandten Bereichen und Gremien sicher, wie der Wasser- und Abwasserwirtschaft, der Versicherungsbranche oder im Bereich Vorhersage und Warnung.

### Zentrale Ergebnisse der Studie zu Praxistransfer

Im Rahmen der Untersuchungen zum Praxistransfer wurden zwischen Oktober 2024 und Januar 2025 insgesamt 20 Praxispartner in Einzelinterviews zu Ihren Eindrücken aus den Projekten befragt. Ziel war es, die Erkenntnisse und Anregungen der beteiligten Unternehmen zu nutzen, um für die verbleibende Laufzeit der Fördermaßnahme WaX sowie für zukünftige Forschungsvorhaben Abläufe und Unterstützungsangebote zu verbessern.

Ein Großteil der Praxispartner stand bereits langjährig vor Beginn der WaX-Forschungsvorhaben in Kontakt zu den beteiligten Universitäten oder Forschungseinrichtungen. Dies begünstigte eine **erfolgreiche Kooperation** und ermöglichte einen schnellen Einstieg in einen gemeinsamen Arbeitsmodus. Außerdem diente dies auch als Basis für die gute interne Kommunikation und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Alle Beteiligten zeigten eine bemerkenswerte Motivation für die jeweiligen Forschungsvorhaben, sowohl um weitere **Erfahrungen zu sammeln** als auch um das **eigene Wissen zu teilen**. Häufig wurde auch die Möglichkeit als motivierend empfunden, durch einen **nachhaltigen Beitrag** zum jeweiligen Fachbereich die **eigene Sichtbarkeit zu erhöhen**.

Die Vielfältigkeit der einzelnen Forschungsvorhaben spiegelt sich auch in den genannten Erfolgen, Risiken und Hindernissen wider. Gemeinhin herrscht jedoch große Zufriedenheit mit den entwickelten Prototypen oder Modellen vor, sowie der Eindruck durch die **frühe Einbindung** als Praxispartner erfolgreich zu praxisnaher Innovation beigetragen zu haben. Als Hürden wurden unter anderem komplexe Genehmigungsprozesse, eine unklare Datenlage, sowie anfängliche Personalengpässe genannt, was zu Verzögerungen im Ablauf führte. In einigen Fällen wurde der Praxistransfer außerdem dadurch erschwert, dass Anwender:innen erst zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess eingebunden waren, oder die entwickelten Produkte bei Projektende teilweise noch nicht die erforderliche Marktreife erreicht hatten.

Positiv ist außerdem zu vermerken, dass die beteiligten Unternehmen nach eigener Aussage nicht nur viel zu ihren Forschungsvorhaben beitragen konnten, sondern auch selbst fachliche Dinge lernen und in die Praxis mitnehmen konnten. Insgesamt teilten die Teilnehmenden daher eine große Bereitschaft, sich auch in Zukunft wieder an Forschungsprojekten des BMBF zu beteiligen.

Ansprechperson: Dr. Antonia Samakovlis, Universität Potsdam



**Wasserspeicherung in der Landschaft**

Während sich die ersten beiden Querschnittsthemen mit übergreifenden methodischen Fragestellungen beschäftigten, wurde im dritten Querschnittsthema das **Potenzial von Wasserspeichermaßnahmen** diskutiert. Wieviel Wasser kann in den einzelnen Kompartimenten einer Landschaft gespeichert werden? Dafür wurden Rückhaltmaßnahmen und Bauwerke in städtischen wie auch in ländlichen Gebieten berücksichtigt. Darüber hinaus wurde diskutiert, wie überschüssiges Niederschlagswasser für die Nutzung in Trockenzeiten gespeichert werden kann. Denn wir erleben in Deutschland in den vergangenen Jahren sowohl eine Zunahme von intensiven Regenereignissen als auch von länger anhaltenden Trockenperioden, während sich der durchschnittliche Jahresniederschlag kaum verändert. Konkret beschäftigte sich die Arbeitsgruppe im Querschnittsthema **„Wasserspeicherung in der Landschaft“** damit, wie Wasserspeicher effektiv genutzt und weiterentwickelt werden können, um das Wassermanagement in Bezug auf Wasserextreme zu verbessern.

Um diesen Fragen nachzugehen, wurden die Forschungsansätze zum Thema Wasserspeicherung gesammelt und diskutiert. Darauf aufbauend wurde ein Muster für einen Steckbrief entwickelt, mit dessen Hilfe **Best-Practice-Beispiele** aus den Verbundprojekten systematisch erfasst wurden.

**Wasserspeicher-Steckbriefe: Best-Practice-Beispiele**

Um kommunalen Akteuren und der wasserwirtschaftlichen Praxis einen Überblick über die Vielseitigkeit an Wasserspeichermaßnahmen für urbane und ländliche Räume zu geben, haben die WaX-Verbundprojekte 28 Steckbriefe mit Best-Practice-Beispielen zusammengestellt. In den Steckbriefen werden die einzelnen Maßnahmen kurz beschrieben und ihre Hauptfunktionen herausgearbeitet. Die erfassten quantitativen Parameter erlauben eine grobe Einschätzung der Größenordnungen der Wasserspeicherung. Zudem enthält jeder Steckbrief ein visuelles Kurzprofil in Form eines Spinnennetzdiagramms. Dies ermöglicht ein schnelles Gesamtverständnis, wofür die jeweilige Wasserspeichermaßnahme grundsätzlich geeignet ist.

Die Steckbriefe können über eine Filterfunktion abgerufen werden. Diese unterstützt die Auswahl geeigneter Maßnahmen je nach Art des Speichers (urban; oberirdisch; oberflächennah und tief), der Art des gespeicherten Wassers (fluviale Hochwasser; urbane pluviale Hochwasser; etc.) oder der Hauptfunktion des Speichers (Regenwasserrückhalt; Hochwasserschutz; Trinkwassergewinnung; etc.).

**Erkenntnis durch einen Vergleich der verschiedenen Maßnahmen**

Ein Vergleich der verschiedenen Maßnahmen zeigt die unterschiedliche Wirksamkeit der verschiedenen Speichertypen. Die **zentralen urbanen Speicher** wie Mischwasserspeicher oder Regenüber-

In einem darauffolgenden Workshop wurden die **Steckbriefe** gemeinsam diskutiert, und sechs **Schlüsselfragen zur Maßnahmenbewertung** entwickelt:

- Wie groß ist die **Wirksamkeit der Maßnahme, ...**
  - » um Hochwasserereignisse (inkl. Überschwemmungen durch Starkregen) zu minimieren?
  - » für die Wasserqualität, indem sie den Schadstoffeintrag in Oberflächengewässer bei Starkregen reduziert?
  - » um Wassermangelsituationen zu entschärfen?
  - » um Wasserüberschuss und -mangel auszugleichen (Ausgleich Landschaftswasserhaushalt)?
  - » für die Trinkwassersicherheit (im quantitativen Sinne)?

In der finalen Arbeitsphase wurden die Steckbriefe vereinheitlicht und aufbereitet, um sie der Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Darüber hinaus wird vom Vernetzungsvorhaben ein Impulspapier zum Thema Wasserspeicherung für die Praxis veröffentlicht, in das die gesammelten Erkenntnisse des Querschnittsthemas eingeflossen sind (<https://www.bmbf-wax.de/ergebnisse-publikationen/wax-veroeffentlichungen>).

laufbecken (siehe „Mischwasserspeicher Waßmannsdorf“, Abb. 2a), dienen vor allem dem Gewässerschutz, indem sie Abflussspitzen in der Regenwasserkanalisation temporär zurückhalten oder die Speicherkapazitäten des Kanalnetzes optimieren. Dadurch wird der Schadstoffeintrag in Oberflächengewässer bei Starkregenereignissen reduziert. Bei den **urbanen dezentralen Speichern** handelt es sich hingegen um blau-grüne Infrastrukturen. Diese halten Regenwasser zurück und können den Oberflächenabfluss bei Starkregen bis zu einem gewissen Grad reduzieren und so urbane Überschwemmungen mindern (siehe „Intensives Gründach“, Abb. 2a). Werden blau-grüne Infrastrukturen durch Elemente zur Wasserspeicherung erweitert, können sie außerdem dabei helfen, Trockenzeiten zu überbrücken (siehe „Versickerungsmulde mit Retentions-Zisterne“, Abb. 2a).

Die **oberirdischen Speicher** umfassen verschiedene Talsperren. Je nach Anlagentyp unterscheidet sich die Hauptnutzung der Talsperren. Die Hauptfunktion liegt jedoch in der Bereitstellung von Trinkwasser, im Hochwasserschutz und in der Wasseraufhöhung bei Niedrigwasser (Abb. 2b).

**Oberflächennahe und tiefe Speicher** können unterschiedliche Funktionen erfüllen (Abb. 2c). Das zentrale Element der technischen Untergrundspeicher liegt in der Kopplung von Hochwasserschutz und Dürrevorsorge (siehe Abb. 2c), indem überschüssiges Wasser im Untergrund gespeichert wird.

Durch die Speicherung von Wasser in Grundwasserleitern (siehe „Injektionsbrunnen“, Abb. 2c) kann der Landschaftswasserhaushalt und somit auch die Trinkwassersicherheit verbessert werden. Natürliche Senken halten Regenwasser zurück und lassen es vor Ort versickern, was durch zuflussfördernde Maßnahmen noch verstärkt werden kann (siehe „Senkenpotential“, Abb. 2c). Dies dient zum einen dem Hochwasserschutz, zum anderen wird der Landschaftswasserhaushalt verbessert.

→ [Zu den Wasserspeicher-Steckbriefen](#)

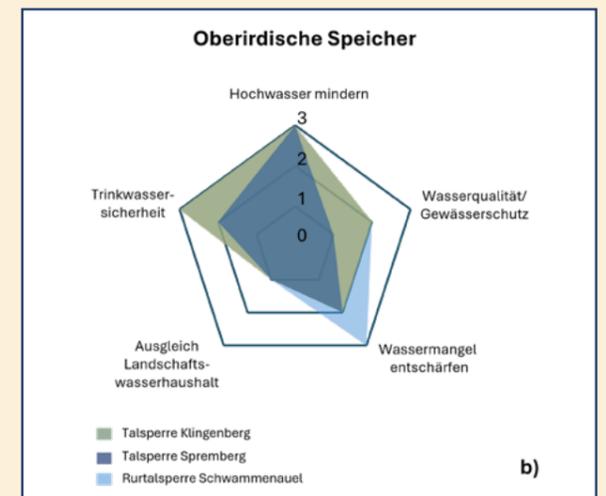
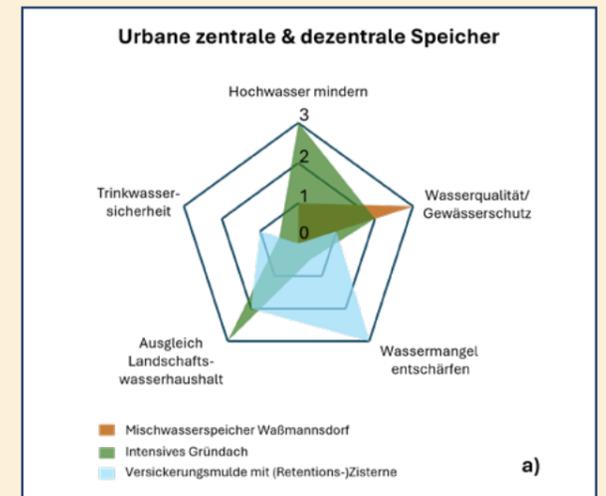


Abb.21 Vergleich der Wirksamkeiten verschiedener Wasserspeicher auf einer Skala von 0 - 3 (aufsteigend, d. h. eine höhere Punktzahl zeigt eine bessere Wirksamkeit an). Angaben basieren auf Experteneinschätzungen aus den WaX-Verbundprojekten.



### Modellierungen und Methoden aus der Informatik

Der Austausch zum vierten Querschnittsthema „Modellierungen und Methoden aus der Informatik“ wurde im April 2023 initiiert. In den übergreifenden Veranstaltungen und Lenkungskreissitzungen wurde deutlich, dass trotz unterschiedlicher methodischer Ansätze aus der Informatik die damit verbundenen offenen Fragen und Herausforderungen zum Teil sehr ähnlich sind. Dabei handelt es sich nicht nur um den Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI), die gerade in jüngster Zeit enorm an Aufmerksamkeit gewonnen hat; aktuell werden auch zahlreiche algorithmische Ansätze erprobt, z. B. aus Numerik und Geometrie. Aber welche Methoden aus der Informatik können für welche Fragestellung genutzt werden? Für welche Anforderungen eignet sich KI in der Hydrologie und welche anderen Methoden sind ggf. besser geeignet? Um diesen Fragen nachzugehen, wurde ein Austausch zu verschiedenen Methoden der Informatik und Modellierungsansätzen gestartet, um Synergien und Schnittstellen zu identifizieren und sich zu ähnlichen Herausforderungen und möglichen Lösungswegen auszutauschen.

Die Mitarbeitenden der Fördermaßnahme der Arbeitsgruppe widmeten sich in zwei Workshops dem breiten **Spektrum methodischer Ansätze zur numerischen Simulation hydrologischer und hydraulischer Prozesse aus der Informatik**. Dort stellten einige Verbände anhand von Impulsvorträgen verschiedene Methoden vor – darunter z. B. skalierbare geometrische Modellierungen (**EXDIMUM**), eine nachvollziehbare Entscheidungsassistent für technisches Betriebspersonal (**Zwille**) und die Eignung von Maschine-Learning-Modellen im Vergleich zu hydrodynamischen Modellen für Überflutungssimulationen (**FloReST**). So wurde z. B. dargestellt, dass eine KI-basierte Entscheidungsassistent (Case-based Reasoning), die mit Expert:innen- und Erfahrungswissen trainiert wurde, Mitarbeitende bereits automatisiert, schnell und nachvollziehbar bei der

Entscheidungsfindung für Maßnahmen in Krisensituationen unterstützen kann.

Die Potenziale dieser Ansätze aus der Informatik gehen jedoch mit einer Reihe von Herausforderungen einher, was z. B. die **Datenverfügbarkeit** und die **Datenqualität** betrifft, insbesondere für Extremereignisse. Gerade für Extremwerte unterliegen die Daten im Zuge aktueller Klimaveränderungen einer enormen Dynamik. Der **Umgang mit Unsicherheiten** lässt weitere Fragen offen, z. B. wie mit Unsicherheiten bei den Eingangsdaten verfahren werden soll und wie diese in Ensemblevorhersagen berücksichtigt werden können. Einige algorithmische Modelle auf der Basis geometrischer Methoden sind jedoch bereits sehr gut in der Lage, **Überflutungssimulationen** in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu erstellen. Auch hier hängt die Qualität der Ergebnisse stark von der Genauigkeit der Eingangsdaten ab, insbesondere der Niederschlagsvorhersage. Genau dort zeigen sich noch Optimierungsbedarfe, vor allem bei längeren Vorlaufzeiten. Großes Potenzial für die **Vorhersage konvektiver Starkregenereignisse** weisen sogenannte Nowcasting-Verfahren auf. Diese nutzen u. a. Bilderkennungsverfahren und neuronale Netze, um basierend auf hochauflösenden Radarbildern den Niederschlagsverlauf der nächsten Stunden vorherzusagen zu können ([Ayzel & Heistermann 2024](#)).

Die Austausche verdeutlichten, welche enorme Bedeutung nicht nur das Thema KI, sondern das gesamte Spektrum von Methoden aus der Informatik bereits einnehmen und auch in Zukunft einnehmen werden. Durch die Identifikation von Synergien und die Diskussion über gemeinsam genutzte Ansätze konnten wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung von Methoden und Werkzeugen gegeben werden. Dieser Dialog wird auch in Zukunft eine entscheidende Rolle dabei spielen, um die Potenziale der Informatik zur Bewältigung von komplexen hydrologischen Fragestellungen voll auszuschöpfen.



Abb. 22 Winterhochwasser 2024, Rhein in Bonn (©Melanie Schwarz, DKKV)

## ZUSAMMENFASSENDE ERKENNTNISSE AUS WAX FÜR EIN VERBESSERTES MANAGEMENT VON WASSEREXTREMEN

Starkregenereignisse und nachfolgende Überflutungen verursachen vielerorts erhebliche Schäden und mitunter lebensgefährliche Situationen. Gleichzeitig führen langanhaltende Trockenperioden zu erheblichen ökologischen und sozio-ökonomischen Problemen und haben regional ein geringeres Wasserdargebot zur Folge. Der Klimawandel verschärft diese gegensätzlichen Extreme weiter (siehe „Hintergrund & Ziele“). Die Entwicklungen zeigen eindrücklich: Es braucht nachhaltige und innovative Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen, um Schäden zu minimieren und vorhandene Wasserressourcen optimal zu nutzen. Die Forschungsverbünde der Fördermaßnahme WaX haben dafür in den vergangenen drei Jahren unterschiedlichste Ansätze und Strategien entwickelt. Die wesentlichen Erkenntnisse und entwickelten Werkzeuge der Projekte werden hier zusammengefasst.

### » Verbesserte Vorhersage von Starkregen, Sturzfluten und Dürren

Starkregenereignisse entstehen in der Regel durch dynamische Gewitterzellen, die räumlich sehr begrenzt auftreten und in ihrer Intensität zeitlich stark variieren können. Das macht die genaue Vorhersage trotz einer immer besser werdenden Verfügbarkeit von Niederschlagsdaten schwierig. In WaX wurden innovative Verfahren entwickelt, die dabei helfen, die **Genauigkeit der Vorhersagen von Starkregen zu verbessern**. Darüber hinaus wurden durch die zeitgleiche Berücksichtigung relevanter hydrologischer Prozesse Starkregenvorhersagen zu **Sturzflutvorhersagen** weiterentwickelt. Mittels eines **Sturzflutindex** können die tatsächlich abfließenden Wassermengen sowie potenzielle Schäden auf regionaler Ebene besser prognostiziert und beurteilt werden. Neben der Starkregenvorhersage wurden ein nutzerspezifisches **Frühwarnsystem für Dürre**, ebenso wie ein **Dürre-Monitoring** entwickelt, die der Land- und Forstwirtschaft helfen können, Schäden zu minimieren.

### » Maßnahmen für einen nachhaltigen Wasserrückhalt in der Landschaft

Naturbasierte dezentrale Wasserrückhaltmaßnahmen, wie die Entsiegelung und Begrünung von Flächen im urbanen Raum, die Renaturie-

rung von Gewässerläufen oder die Anbindung von Auen als Überschwemmungsflächen, können Hochwasser-Abflussspitzen gezielt abmildern und gleichzeitig Wasser im Einzugsgebiet halten. Dadurch wird die Grundwasserneubildung gefördert und die Auswirkungen von Trockenperioden werden reduziert. In WaX wurde das Potenzial verschiedener naturbasierter, aber auch technischer Maßnahmen zur Verbesserung eines nachhaltigen Landschaftswasserhaushalts systematisch untersucht. Zur Auswahl geeigneter Maßnahmen wurde eine **Entscheidungshilfe** in Form eines **modularen Werkzeugkastens** entwickelt. Für verschiedene **innovative Wasserspeichermaßnahmen**, wie etwa die künstliche Grundwasseranreicherung oder gesteuerte Drainagen, wurden Standortanalysen durchgeführt oder die Umsetzbarkeit an Pilotstandorten getestet.

Maßnahmen, die **Hochwasserschutz und Dürrevorsorge direkt miteinander koppeln**, weisen ein besonders hohes Potenzial auf, um mit schnell wechselnden Wetterbedingungen umzugehen. Durch die Entwicklung **smarter multifunktionaler Wasserspeicher** ist es gelungen, Wasserrückhaltmaßnahmen technisch so zu erweitern, dass **überschüssiges Wasser nach einer Aufbereitung in den Grundwasserleiter infiltriert und dort gespeichert** werden kann. Auf diese Weise können nicht nur Schäden durch Hochwasser reduziert, sondern auch die Auswirkungen von Trockenheit abgemildert werden.

### » Effektive Kombination verschiedener Maßnahmen im urbanen Raum

Im urbanen Raum fördern **blau-grüne Infrastrukturen** die dezentrale Versickerung von Regenwasser und können den Oberflächenabfluss bei Starkregen reduzieren. Ihr Potenzial für die Dürre- und Starkregenvorsorge kann durch gezielte Anpassungsmaßnahmen erweitert werden, z.B. durch die Schaffung zusätzlicher Speicherräume. In WaX wurde dieses Potenzial systematisch untersucht. Für zwei Pilotstädte wurden **Planungsinstrumente** geschaffen, die eine gezielte Auswahl passender Maßnahmenkombinationen für den urbanen Raum ermöglichen. Darüber hinaus wurden Systeme für eine

**dynamische Steuerung des Kanalnetzes** entwickelt, die eine effektivere Auslastung bei intensiven Regenfällen ermöglichen. Vorbeugende Spülvorgänge wirken gleichzeitig verstärkter Sedimentation und Geruchsbildung während Trockenperioden entgegen. Daneben wurden Methoden für eine präzise Ausweisung von **Notabflusswegen** erarbeitet. Über solche Notabflusswege können Wassermassen möglichst schadfrei durch die urbane Bebauung geleitet werden.

Insgesamt haben die Forschungen in WaX gezeigt, wie wichtig es ist, die Stadtentwässerung ganzheitlich mit allen relevanten Komponenten und Aspekten zu betrachten, einschließlich der Abwasserentsorgung, der Gewässer und des Stadtraums selbst. Zu diesem Zweck, wurde für einen Pilotstandort ein **Digitaler Zwilling** für ein sektorübergreifendes Management von Wasserextremen im urbanen Raum geschaffen.

### » Neue Konzepte für das Management von Niedrigwasser und für die Trinkwasserversorgung

Niedrigwasser in Flüssen und niedrige Grundwasserspiegel wirken sich unterschiedlich auf die betroffenen Akteure aus. Dazu zählen Wassernutzer aus Industrie, Landwirtschaft, Wasserversorgung, Schifffahrt und Freizeit. Um die verschiedenen Interessen zu berücksichtigen, wurde eine **Niedrigwasserrisikoanalyse** zur Unterstützung bei der Entwicklung von **Priorisierungs- und Konfliktlösungsstrategien** entwickelt, die wasserwirtschaftliche, sozioökonomische und ökologische Aspekte vereint. Besondere Bedeutung kommt dabei der **Trinkwasserversorgung** gegenüber Wetterextremen zu stärken,

wurden standortangepasste Vorsorgekonzepte und Werkzeuge entwickelt, die dabei helfen, Spitzenlasten auch in Dürreperioden sicher abzudecken bzw. zu verringern.

### » Verbesserte Risikokommunikation und Praxistransfer

Neue **Kommunikations- und Partizipationsansätze**, wie Citizen Science, können ein stärkeres Bewusstsein im Umgang mit Wasserextremen in der Gesellschaft schaffen. Die Entwicklung einer **Smartphone-App** sowie der Einsatz von **zielgruppenspezifischen Storylines** tragen dazu bei, lokales Wissen zu Starkregenereignissen zu erfassen und die Bevölkerung über Wasserextreme zu informieren. Indem klassische Gefahrenkarten so erweitert wurden, dass sie die potenzielle Betroffenheit und Schäden darstellen, werden die möglichen Folgen von Starkregen für Menschen, Gebäude und Infrastruktur in den Fokus gerückt und können zielgruppengerechter kommuniziert werden. Die Erfahrungen aus den Projekten zeigen weiterhin, dass zur Förderung des Transfers von Forschungsergebnissen in die wasserwirtschaftliche Praxis eine **frühzeitige Einbindung der relevanten Akteure aus der Praxis** unverzichtbar ist.

Die vorgestellten Erkenntnisse und Werkzeuge für einen nachhaltigen und vorsorgenden Umgang mit Starkregen- und Sturzflutereignissen sowie mit Dürre- und Niedrigwassersituationen bieten nicht nur eine wertvolle Wissens- und Handlungsgrundlage für kommunale und regionale Akteure. Weiterhin eröffnen sie auch konkrete Perspektiven für die praktische Umsetzung von Anpassungsstrategien. Die Ansätze wurden in enger Kooperation mit Partnern aus der Praxis entwickelt.

## WEITERE VERBUNDÜBERGREIFENDE INFORMATIONEN UND LINKS



### Für die Praxis:

- » **WaX-Impulspapiere** mit neuen Ansätzen und Erkenntnissen für die kommunale und regionale Praxis:
  - **Starkregen und Sturzfluten**, Juni 2024  
[https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/WaX-Impulspapier\\_Starkregen-Sturzfluten-1.pdf](https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/WaX-Impulspapier_Starkregen-Sturzfluten-1.pdf)
  - **Dürre und Niedrigwasser**, September 2024  
[https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/WaX-Impulspapier\\_Duerre-Niedrigwasser.pdf](https://www.bmbf-wax.de/wp-content/uploads/WaX-Impulspapier_Duerre-Niedrigwasser.pdf)
  - **Wasserspeicherung**, geplant für April 2025  
<https://www.bmbf-wax.de/ergebnisse-publikationen/wax-veroeffentlichungen>
- » **WaX-Steckbriefe:** Best-Practice-Beispiele für die Wasserspeicherung. Sammlung von Steckbriefen zu innovativen Wasserspeichermaßnahmen aus den WaX-Verbänden, abrufbar über eine Filterfunktion.  
<https://www.bmbf-wax.de/querschnittsthemen/wasserspeicherung/steckbriefe/>
- » **WaX-Lunchtalks:** Wasserextreme im Fokus – Neue Impulse aus der Forschung. Einblicke in praxisrelevante Ergebnisse und Erkenntnisse der Forschungsprojekte. Oktober bis November 2024. Aufzeichnungen der Vorträge und Folien: <https://www.bmbf-wax.de/lunchtalks/>



### Für die breite Öffentlichkeit:

- » **Pixi Wissen** zum Thema: Starkregen und Dürre – Wie gehen wir mit Wasserextremen um? Carlsen Verlag, Hamburg, 2025.
- » **Kurzfilm** zu Wasserextreme  
<https://www.bmbf-wax.de/ergebnisse-publikationen/wax-veroeffentlichungen>



### Für die Wissenschaft:

- » Zeitschriftenübergreifende Kollektion „**Water extremes: Innovative approaches to manage floods and droughts**“ in den englischsprachigen Copernicus-Fachzeitschriften NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences) und HESS (Hydrology and Earth System Sciences) mit 16 Fachartikeln aus WaX.  
[https://www.natural-hazards-and-earth-system-sciences.net/articles\\_and\\_preprints/scheduled\\_collections.html#11](https://www.natural-hazards-and-earth-system-sciences.net/articles_and_preprints/scheduled_collections.html#11)  
Fortlaufend, weitere Artikel werden im Laufe der kommenden Monate hinzugefügt.



### Für die Wissenschaft & Praxis:

- » **Themenheft** zur Fördermaßnahme Wasser-Extremereignisse WaX in der HyWa – Fachzeitschrift „**Hydrologie und Wasserbewirtschaftung**“ der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit 9 Fachartikeln aus WaX. Veröffentlichung geplant für Ende 2025.

## Bleiben Sie auf dem Laufenden:

### » WaX-Newsletter:

<https://www.bmbf-wax.de/ergebnisse-publikationen/wax-newsletter>  
Insgesamt 11 WaX-Newsletter mit jeweils Neuigkeiten aus den Verbundprojekten und übergreifenden Aktivitäten.

### » Abonnieren Sie hier unseren Newsletter:

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

### » Weitere Informationen zur Fördermaßnahme WaX unter:

[www.bmbf-wax.de](http://www.bmbf-wax.de)

### » Folgen Sie dem DKKV auf Social Media:



@dkkv\_germandrr [https://www.instagram.com/dkkv\\_germandrr/](https://www.instagram.com/dkkv_germandrr/)



@Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.  
<https://de.linkedin.com/company/deutsches-komitee-katastrophenvorsorge-e-v>

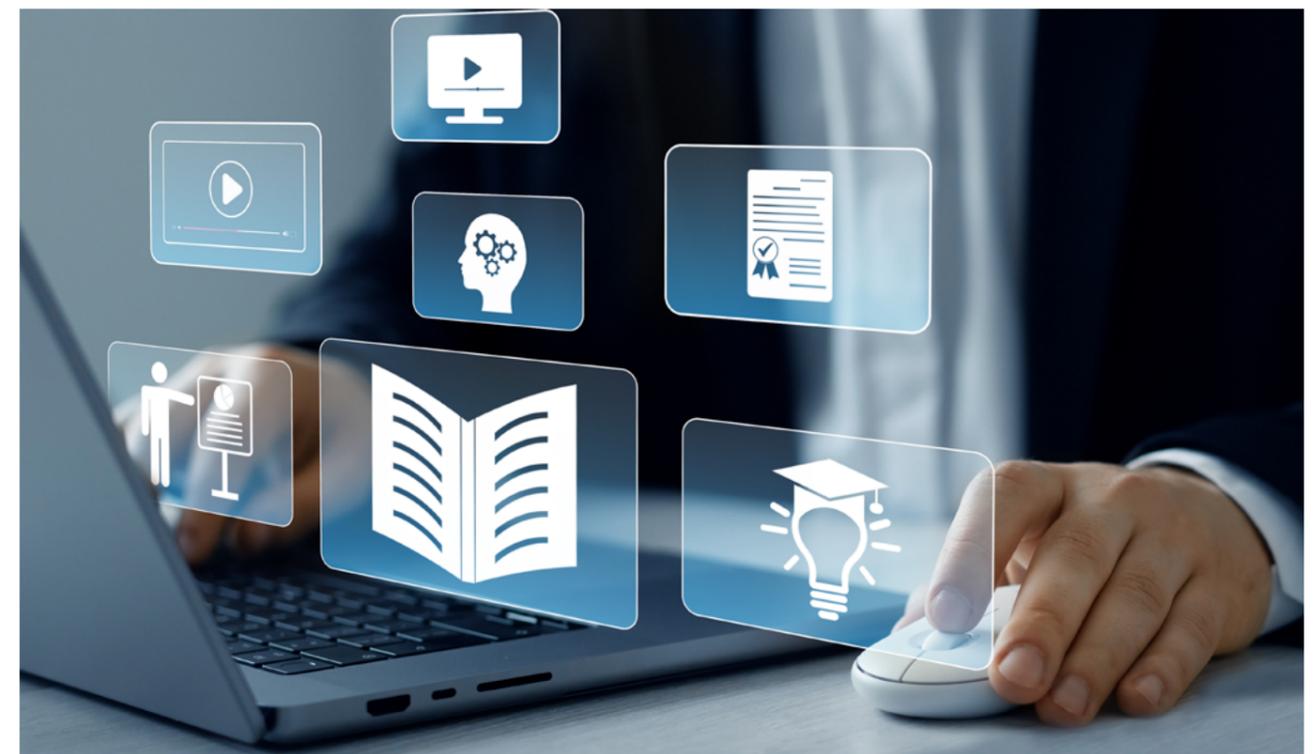


Abb.22 Digital internet lessons (©Mer\_Studio)



[www.bmbf-wax.de](http://www.bmbf-wax.de)