

Sándor P. Fekete, Pedro M. Achanccaray Diaz, Michael Figge, Nicola Fohrer, Markus Gerke, Simon Giutronich, Phillip Keldenich, Sebastian Lutz, Michael Perk, Andreas Reinhardt, Christoph Richter, Christian Rieck, Björn Riedel, Tim Riedemann, Fatemeh Saba, Konstantin Schrader, Anne Schröter, Daniel Szafranski, Aida Taghavi, Paul D. Wagner & Tobias Wallner

Wasserwirtschaft im Zeichen von Extremwetter

Water management in times of extreme weather

Die Zunahme von Extremwetterlagen stellt die kommunale Wasserwirtschaft vor erhebliche Herausforderungen. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, vormals Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) geförderten Projekts „Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden“ (EXDIMUM) wurden in einem Untersuchungsgebiet um die Stadt Goslar im Harz praxisnahe Methoden zur Erfassung, Modellierung und Visualisierung von Starkregen- und Dürreereignissen entwickelt und getestet.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Experten aus Wasserwirtschaft, Algorithmik, Fernerkundung, Softwareentwicklung und Hydrologie ermöglichte dabei die Nutzung vielfältiger Datenquellen: So wurden multispektrale SAR-Daten (für Synthetic Aperture Radar) aus der Fernerkundung zur Landnutzungs- und Totholzflächen Erfassung zusammen mit hydrologischen Parametern zur großflächigen und langfristigen Simulation des Wasserabflusses und der Auswirkungen des Baumsterbens genutzt. Weiterhin konnten drahtlose Sensornetze für Pegel, Niederschlag, Bodenfeuchte sowie für das Zustandsmonitoring von Abflussgittern aufgebaut werden.

Mithilfe hydraulischer und hydrodynamischer Modelle sowie Techniken der algorithmischen Geometrie, wie etwa quadtree-basierter dynamischer Auflösung, konnte die Effizienz der Simulation von Starkregenabflüssen gegenüber bisher gebräuchlichen Methoden entscheidend gesteigert werden. Bei vergleichbarer Genauigkeit sind dadurch Berechnungszeiten unterhalb der Ereignisdauer erreichbar, d. h. prinzipielle Echtzeitfähigkeit wird möglich. Ein begleitendes Dashboard ermöglicht die Zusammenführung und visuelle Präsentation von Fernerkundungs-, Sensor- und Simulationsergebnissen. Der Echtzeitbetrieb des Sensornetzwerks hat sich bei der Überwachung des Hochwassers im Dezember 2023 in Goslar bewährt und leistet einen Beitrag zur optimierten Maßnahmenplanung im Katastrophenfall.

Schlagwörter: Wasserwirtschaft, Extremwetter, Extremwasserereignisse, Überflutung, Abfluss, Modellierung, Simulation, Maßnahmenplanung

The increase in extreme weather conditions poses considerable challenges for municipal water management. As part of the project „Extreme weather management with digital multiscale methods“ (EXDIMUM), supported by the Federal Ministry of Research, Technology, and Space (BMFTR, formerly the Federal Ministry of Education and Research, BMBF), practical methods for tracking, modelling, and visualizing heavy rainfall and drought events were developed and tested in a study area around the city of Goslar in the Harz Mountains. The interdisciplinary collaboration of experts from water management, algorithmics, remote sensing, software development, and hydrology enabled the use of a wide range of data sources: For example, multispectral SAR (Synthetic Aperture Radar) data from remote sensing was used to record land use and deadwood areas, together with hydrological parameters for large-scale, long-term simulation of water runoff and the effects of tree mortality. In addition, wireless sensor networks were established to record water levels, precipitation, soil moisture, and the status of culvert grates.

With the help of hydraulic and hydrodynamic models as well as algorithmic geometry techniques such as quadtree-based dynamic resolution, the efficiency of heavy rainfall runoff simulations was significantly increased compared to previously used methods. With comparable accuracy, computation times shorter than the duration of the event are achievable, i.e., real-time computation has become possible in principle. An accompanying dashboard enables the integration and visual presentation of remote sensing, sensor, and simulation results. The real-time operation of the sensor network proved successful in monitoring the flood event in December 2023 in Goslar and contributes to improved planning of measures in disaster scenarios.

Keywords: Water management, extreme weather, extreme water events, flooding, runoff, modeling, simulation, planning of measures

1 Einleitung

Im Zuge des Klimawandels nimmt die Wahrscheinlichkeit und Intensität von Extremereignissen immer weiter zu, mit besonderer Trockenheit und Hitzewellen auf der einen und Starkregenereignissen auf der anderen Seite (FISCHER et al., 2021; DEUMLICH, 2020). Wie nachfolgend beschrieben, stellt dies auch die kommunale Wasserwirtschaft vor immer größere Schwierigkeiten, frühzeitig gezielte und wirksame Maßnahmen zu ergreifen. Dabei sind die Betreiber kommunaler Wassernetze nicht nur mit akuten Notsitu-

ationen konfrontiert: Sie stehen auch vor der Aufgabe, die mittel- und langfristige Gestaltung der Infrastruktur für die Wasserversorgung mit dem Schutz der gesamten Kommune zu verbinden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich besonders gut anhand der Stadt Goslar und des umgebenden Einzugsgebiets im Harz darlegen. Bei Starkregenereignissen kommt es hier aufgrund des Gefälles im relativ großen Einzugsgebiet nicht nur zu großen Abflussmengen und Fließgeschwindigkeiten, sondern auch zu sehr kurzen Vorwarnzeiten.

Mit solchen Situationen hat die Stadt historisch viel Erfahrung: Sowohl die Oberharzer Wasserwirtschaft als auch die Goslarer Altstadt mit der Kaiserpfalz sind jeweils UNESCO-Weltkulturerbe mit einer viele Jahrhunderte alten Geschichte, was von einem erfolgreichen Umgang mit natürlichen Herausforderungen in einer bislang gut beherrschbaren Lage zeugt. Bei den in Goslar aufgetretenen Extremwasserereignissen der Jahre 2014 und 2017 zeigte sich aber die Verwundbarkeit im Untersuchungsgebiet gegenüber Auswirkungen der klimatischen Entwicklung.

Charakteristisch für Goslar sind teils kleine, aber ergiebige Regenzellen, welche in bestimmten Bereichen des Stadtgebiets zu potenziell katastrophalen Abläufen führen können. So wurde im Mai 2023 im Rahmen des nachfolgend beschriebenen Projektes für eine kleine Gewitterzelle im Bereich des Herzbergs oberhalb von Goslar ein Niederschlag von 80 mm innerhalb von nur einer Stunde gemessen; schon eine Verschiebung von wenigen Kilometern in den Einzugsbereich von Goslar oder gar eine größere Ausdehnung hätte für die Stadt potenziell dramatische Folgen haben können (IBEUCHI, 2021), da vor allem die Bereiche in der Altstadt rund um den Nebenfluss Abzucht einem höheren Hochwasserrisiko ausgesetzt sind. Zur Komplexität der Hochwasserproblematik tragen auch durch die Folgen von Trockenperioden bei: Aufgrund von Dürren hat das Baumsterben im Harz seit dem Jahr 2015 stark zugenommen (KONG et al., 2022). Der daraus resultierende verstärkte Oberflächenabfluss sowie das erhöhte Erosionsrisiko verschärfen potentiell das Hochwasserrisiko im Unterlauf.

2 Ausgangslage

2.1 Randbedingungen für Wasserversorger

Die Randbedingungen für Wasserversorger sind z. T. schriftlich festgehalten in Regelwerken der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), die konkret an Netzbetreiber gerichtet sind. Dazu gehören DWA-M 103 mit der Beschreibung von Vorsorgemaßnahmen für den Hochwasserschutz für Abwasseranlagen und DWA-M 553 für hochwasserangepasstes Planen und Bauen mit der Steuerung vorhandener und Planung neuer Wasserspeicher sowie dem angepassten Wiederaufbau der Infrastruktur nach Extremwetterereignissen. Allerdings betrachten diese Regelwerke die Auswirkung von niederschlagsbedingten Sturzfluten auf Abwasseranlagen nicht, wie sie sich z. B. 2002 in Dresden und 2021 im Ahrtal ereigneten.

Ein vollständiger Hochwasserschutz gegen Abflüsse beliebiger Menge bzw. Jährlichkeit durch bauliche Einrichtungen ist daher unmöglich oder zumindest nicht wirtschaftlich durchführbar. So erfolgte die Auslegung der Hochwasserschutz-Anlagen bislang anhand historischer Niederschlagsreihen, insbesondere einem statistischen 100-jährigen Ereignis; solche Extremereignisse traten in den letzten 10 bis 15 Jahren allerdings in Menge und zeitlicher Verteilung verstärkt auf. Zudem sind bauliche Maßnahmen, wie die Schaffung zusätzlicher Rückhalteräume für den Rückhalt von Abflüssen der natürlichen Flächen, aufgrund von Bebauung und Topografie mangels verfügbarer Flächen oft schwer bis unmöglich. Die vorhandenen Rückhalteräume dämpfen allerdings lediglich die Abflussspitzen im Kanalnetz, da die Niederschlagsmengen von Starkregen meist nur für kurze Zeit zurückgehalten werden können. Bei länger andauernden und großflächigen Extremregenereignissen kann es deshalb dazu kommen, dass das vorhandene Volumen der Regenrück-

haltung nicht ausreicht und das Becken überläuft. Daher liefern die Regenrückhaltebecken im Gegensatz zu Hochwasserschutzanlagen keinen nennenswerten Beitrag zum Hochwasserschutz.

2.2 Aktueller Kontext

In der Region Goslar sind bislang eine ganze Reihe von Schutzmaßnahmen erfolgt: Seit ca. 2015 gibt es erste Hochwasserschutzkonzepte der zuständigen niedersächsischen Landesbehörden, die auch das vorhandene Volumen von 360 Mio. m³ in 26 Talsperren und Stauseen mit einbeziehen. Trotzdem kam es im Jahr 2017 dazu, dass das Volumen der Retentionsräume um Goslar nicht ausreichte und nach starken Regenfällen umliegende Kommunen einer Flutwelle ausgesetzt waren. So ist bei allen zu planenden Maßnahmen mit zu berücksichtigen, dass ein Restrisiko bleibt; es gilt, nach dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit den geleisteten Aufwand und die erzielte Risikominimierung abzuwägen und möglichst effektive Maßnahmen zu identifizieren und einzusetzen.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Situation nach einer möglichen, nicht verhinderbaren Überflutung einzubeziehen. Dazu gehört die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit durch Netzbetreiber bzw. Gebäudeeigentümer von Kanalisation und offenen Gewässerabschnitten, u. a. durch Kanalreinigung, Beseitigung von Verlegungen an Durchlässen oder Beseitigung von Geschiebe. Andererseits kann es sinnvoll sein, zerstörte Einrichtungen nicht identisch am selben Ort wiederzuerrichten, sondern geeignet zu verlegen, wie etwa in Sinzig am Rhein, wo die durch die Ahrtalflut zerstörte Kläranlage 120 cm höher neu gebaut wurde.

In diesem Kontext ergibt sich ein erheblicher Bedarf für Modellierungen, um auch fiktive Konstellationen überprüfen zu können. Ein detaillierteres Bild dieses Bedarfs, sowohl an Modellierungen zum aktuellen Stand als auch in Vorbereitung von Verbesserungen, wurde im Rahmen des Projektes EXDIMUM bei Netzbetreibern, Kommunen und Rettungsdiensten erhoben und wird nachfolgend dargestellt.

2.3 Projekt EXDIMUM

Die nachfolgende Darstellung beschreibt wesentliche Inhalte des Projekts „Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden“ (EXDIMUM), das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, vormals BMBF), gefördert wurde und sich beispielhaft im Untersuchungsgebiet mit Fragestellungen zu Extremwetter beschäftigt. Dabei kombiniert das Projekt praktische Expertise aus der Wasserversorgung mit wissenschaftlicher Grundlagenarbeit aus Algorithmik, Fernerkundung und Hydrologie.

Im Rahmen des Projektes werden die gegensätzlichen Extreme aus zwei komplementären Blickrichtungen betrachtet; Kapitel 5 behandelt dies im Detail. Einerseits gehört dazu die hydraulische Perspektive für die Modellierung von Überflutungsereignissen, bei der die räumliche Verteilung von Wasser aufgrund der geometrischen Struktur des Geländes modelliert wird (ARGE et al., 2023). Eine besondere Herausforderung, die im Rahmen des Projekts untersucht wurde, ist dabei die zeitliche Dynamik des Oberflächenabflusses. Andererseits beruht die Analyse von Trockenheit auf der hydrologischen Modellierung des Wasserhaushalts, für die das Modell SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) genutzt wurde (ARNOLD et al., 1998; BIEGER et al., 2017), das

insbesondere für die Untersuchung der Auswirkungen von dynamischen Landnutzungsänderungen auf die Hydrologie geeignet ist (WAGNER et al., 2019).

Die Datenbasis für diese Untersuchungen stammt dabei aus drei verschiedenen Quellen: Dazu gehören Fernerkundungsdaten für die Klassifikationen der Landnutzung und des Baumsterbens bzw. zum großräumigen Monitoring der Bodenfeuchte (Kap. 4.1); hochaufgelöste Geländedaten für die Modellierung des Abflusses (Kap. 4.2) und terrestrische Sensordaten für die Kalibrierung der Modelle sowie die Echtzeitverfolgung in Katastrophenszenarien (Kap. 4.3).

2.4 Untersuchungsgebiet

Das rund 370 km² große Untersuchungsgebiet um Goslar erstreckt sich vom ebenen Oker-Vorland, das auf etwa 100 m ü. NN liegt, bis in die dicht bewaldeten Hochlagen des Harzes nahe dem Brocken, wo es fast 800 m ü. NN erreicht. Es wird

von nordwärts entwässernden Gebirgsbächen wie Oker, Grane, Abzucht und Radau zerschnitten; deren Läufe werden in der Oker- und Granetalsperre aufgestaut und bilden markante Wasserflächen im südlichen Teil des Areal. Knapp die Hälfte der Fläche ist von Nadel- und Laubwald bedeckt. Acker- und Grünland dominieren die Vorländer, während sich Siedlungen auf Goslar, Bad Harzburg und Vienenburg konzentrieren. Klimatisch herrscht ein gemäßigtes Regime mit einem ausgeprägten Sommerniederschlagsmaximum von Juli bis August und einem Minimum im späten Frühjahr. Abbildung 1 zeigt eine topografische Karte des Untersuchungsgebiets.

3 Bedarf bei Netzbetreibern, Kommunen und Rettungsdiensten

Zur Erhebung praxisrelevanter Anforderungen und Spezifikation des Gesamtsystems wurde ein „Runder Tisch“ organisiert, bei dem auch projektexterne Teilnehmende aus dem Kreis Goslar identi-

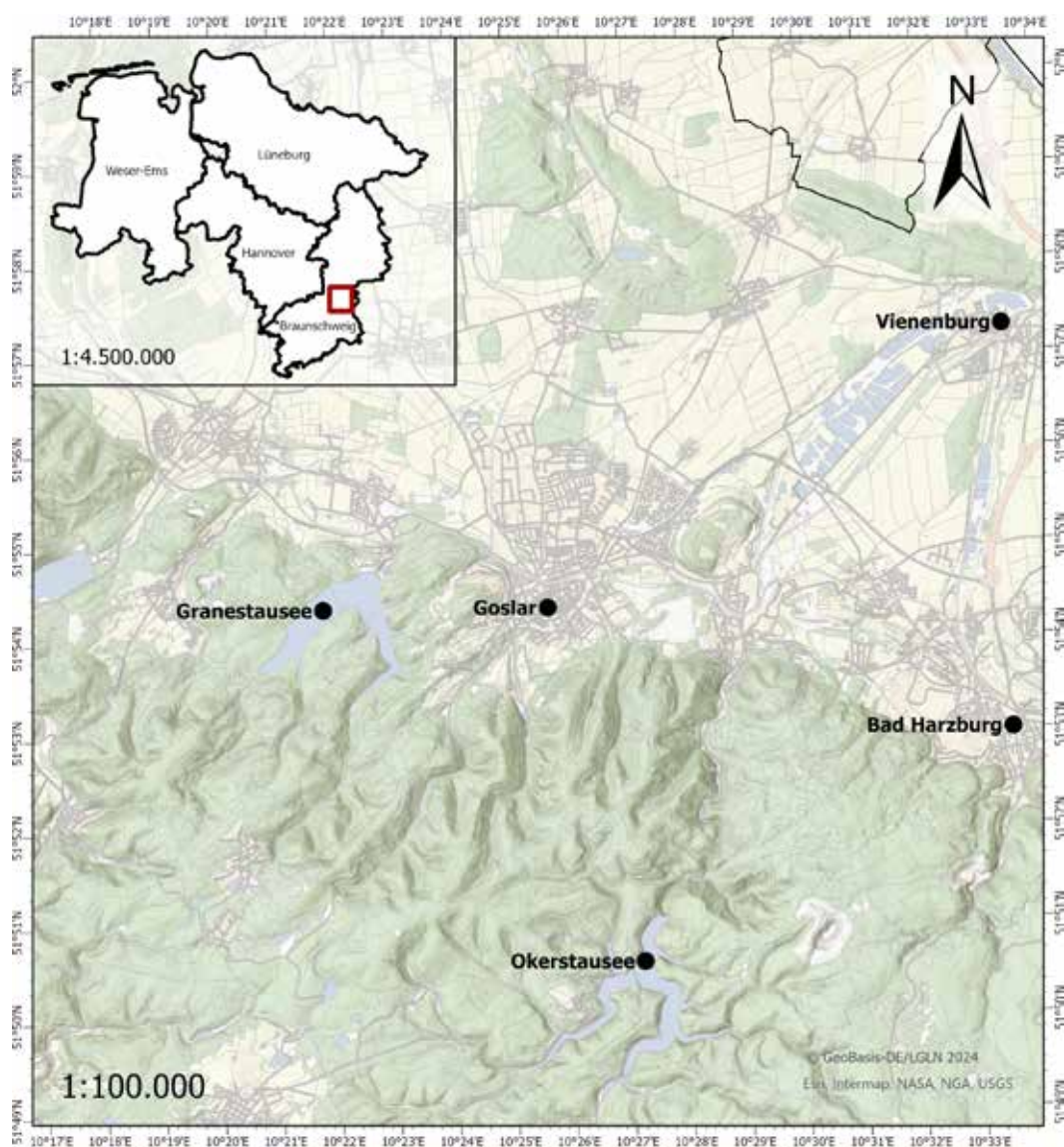


Abbildung 1

Karte des Untersuchungsgebiets, erstellt basierend auf LGLN (2022).

Map of the study area, based on Lower Saxony OpenGeoData.

ziert und zusammengebracht wurden. Ziel des Runden Tisches war es dabei, ein Netzwerk zwischen den einzelnen Projektteilnehmern sowie notwendigen Institutionen wie Feuerwehr, Unterhaltungsverbänden, Forstämtern und Grundeigentümern aufzubauen. In diesem Kontext erfolgten auch umfangreiche Befragungen zur Bedarfserhebung, die im Folgenden dargestellt werden.

Bei einem Rücklauf von insgesamt 71 vollständigen Antworten ergab sich dabei ein sehr aufschlussreiches Bild: 68 der Antwortenden waren bereits von starkregenbedingtem Hochwasser betroffen, davon 50 mit Folgen (Abb. 2). Demgegenüber standen nur sehr vereinzelte Hochwasserübungen: Lediglich drei Befragte nehmen regelmäßig an Übungen teil, 23 immerhin gelegentlich, aber die überwiegende Mehrheit von 45 nie (Abb. 3).

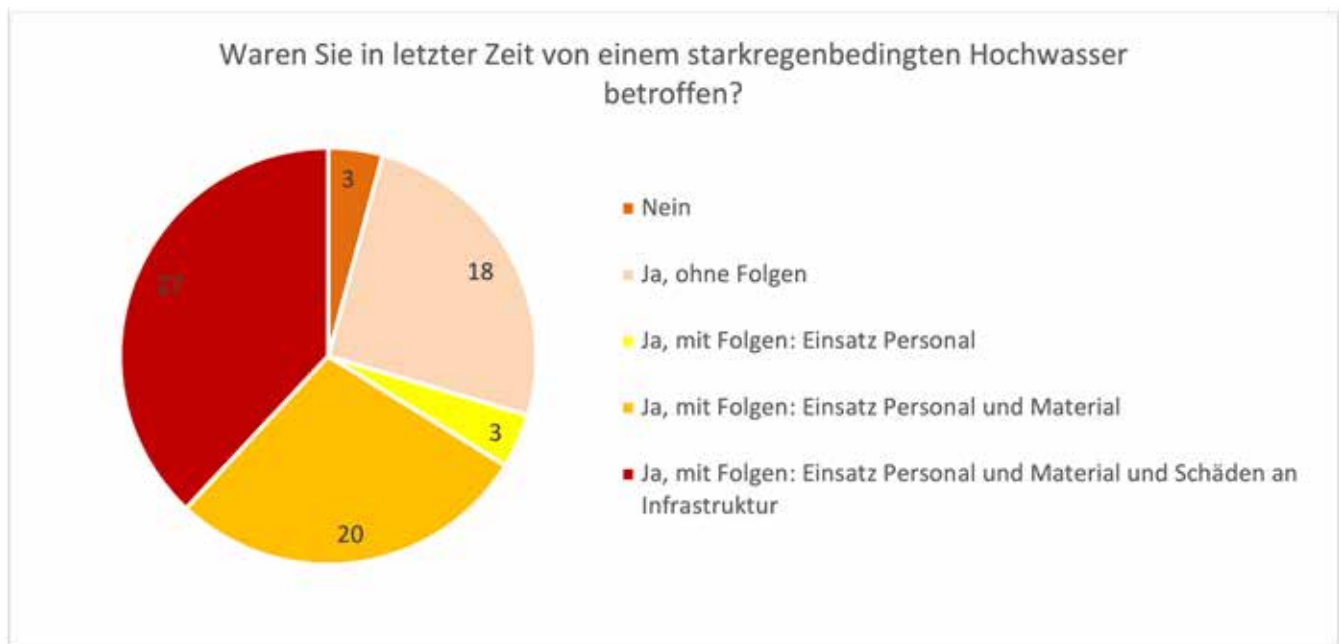


Abbildung 2
Erhebung: Betroffenheit von starkregenbedingtem Hochwasser.
Survey: Affected by heavy rainfall-related flooding.



Abbildung 3
Verbreitung von Hochwasserübungen.
Prevalence of flood exercises.

Sehr breit ist entsprechend auch der Bedarf an zusätzlicher Unterstützung. In allen Bereichen wurde von einer Mehrheit der Befragten zusätzlicher Unterstützungsbedarf angemeldet (Abb. 4). Dazu gehören

- eine Verbesserung der Datengrundlage, z. B. durch Erhöhung der Messdichte und verbesserte Darstellung über Web-dienste,
- der technische Hochwasserschutz, etwa mittels der Schaffung neuer Retentionsflächen, dem Bau und Unterhalt technischer Schutzanlagen oder der Integration in die Stadtplanung,
- die Kommunikation, bspw. durch die Bildung einheitlicher Meldekettten und Verantwortlichkeiten oder die Schulung

von Personal im Umgang mit unterschiedlichen Starkregenereignissen, sowie

- eine modelltechnische Unterstützung.

Im Bereich der modelltechnischen Unterstützung, wie er konkret im Projekt EXDIMUM untersucht wird, zeigte ein differenzierter Blick sogar noch größeren Bedarf: In allen Aspekten dieses Bereichs wurde von mehr als der Hälfte der Befragten fehlende, aber wünschenswerte Unterstützung benannt, z. T. von bis zu mehr als 75 %. In fast allen Bereichen gaben weniger als 25 % der Befragten an, dass bereits Lösungen für ihren Bedarf existieren (Abb. 5).

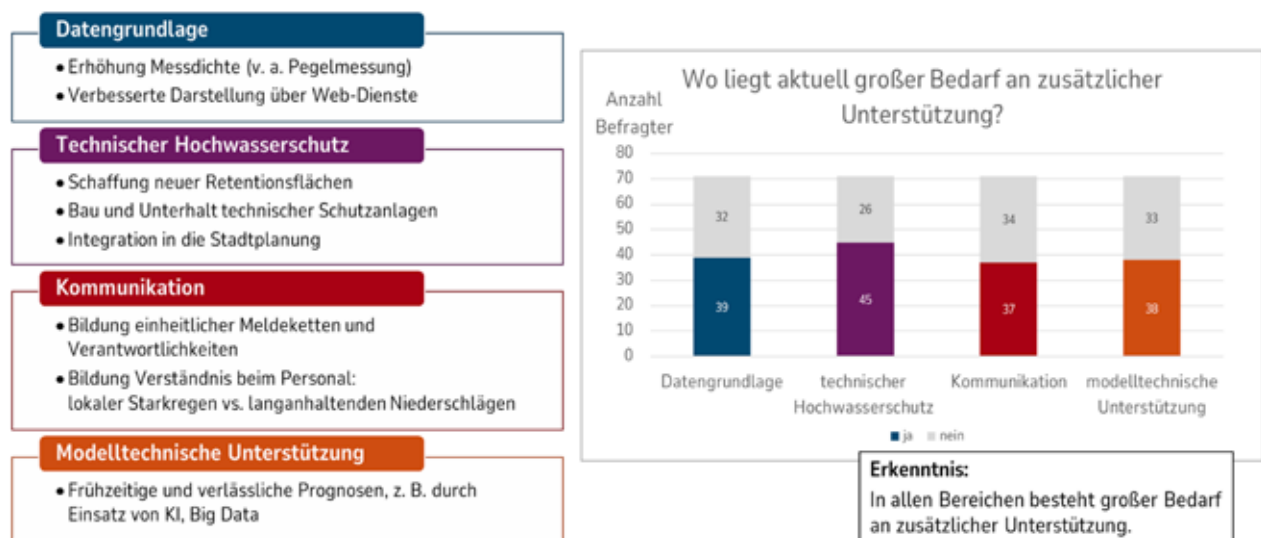


Abbildung 4

Erwartungen an den zukünftigen Umgang mit Hochwasser.
Expectations for the future handling of floods.

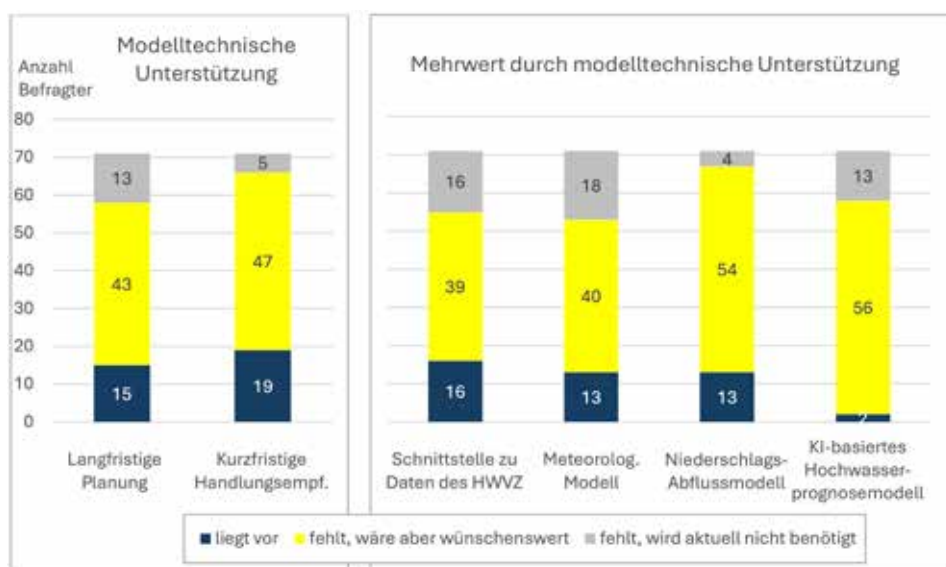


Abbildung 5

Bedarfserhebung für modelltechnische Unterstützung.
Needs assessment for technical model support.

4 Datenbasis

Den unterschiedlichen Skalen der Grundproblematik wurde durch unterschiedliche Datenquellen Rechnung getragen. Dazu gehören Fernerkundungsdaten, hochauflösende Geländedaten sowie Bodensensorik auf der Basis eigener drahtloser Sensornetze.

4.1 Fernerkundungs- und Geländedaten

Die zunehmende Häufigkeit, Intensität und Persistenz von Extremereignissen sowie ihr Zusammenhang mit Veränderungen der Landnutzung und -bedeckung (Land-use, Land-cover, LULC) (NAHA et al., 2020) unterstreichen die Notwendigkeit der Erstellung von LULC-Klassifizierungskarten zur Integration in die SWAT+-Modellierung in diesem Projekt (Kap. 5.2). Fortschritte in der Fernerkundung haben die Möglichkeiten zur großflächigen, multi-temporalen Überwachung der Bodenbedeckung erheblich verbessert. Der synergetische Einsatz von optischen Sensoren wie von Sentinel-2 und Radarsystemen wie von Sentinel-1 ermöglicht eine umfassende Merkmalsextraktion: Optische Daten liefern reichhaltige spektrale Informationen, insbesondere sichtbare, Nahinfrarot- (NIR), short-wave-infrared- (SWIR) und Rotrandbänder, während das Radar aufgrund der physikalischen Eigenschaften Strukturdaten liefert und unabhängig von der Wolkenbedeckung Daten erfassen kann. Dieser komplementäre Ansatz verbessert das Lernen von Merkmalen durch sensorübergreifenden Wissenstransfer, was besonders wertvoll ist, um die Einschränkungen einzelner Sensoren zu überwinden (LIU et al. 2025).

Im Rahmen von EXDIMUM wurden sowohl die multispektralen Daten von Sentinel-2 als auch die C-Band-Daten von Sentinel-1 in Kreuz- und Co-Polarisation verwendet, die während der Vegetationsperiode von Juli bis August in den Jahren 2018 bis 2023 aufgenommen wurden. Die Untersuchung konzentrierte sich dabei auf sieben LULC-Klassen: Ackerland, Grasland, bebaute Gebiete, Gewässer, Nadelbäume, Laubbäume und abgestorbene Bäume. Die Referenzdaten dafür wurden aus drei Hauptquellen zusammengestellt: WorldCover-Karten der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) für nicht baumbezogene Klassen (ZANAGA et al., 2020; ZANAGA et al., 2021), eine Baumartenkarte für Nadel- und Laubbäume (BLICKENSDORFER et al., 2024), und eine in hochauflösenden Bildern manuell erstellte Referenzkarte für abgestorbene Baumflächen. Schließlich wurden diese drei Referenzkarten zusammengeführt und zum Trainieren des Modells in einem überwachten Lernverfahren verwendet (LETTMODEN et al., 2025; SABA et al., 2025).

Die räumlich-zeitliche Dynamik der Bodenfeuchtigkeit spielt eine entscheidende Rolle für Grundwasserfluss, Überschwemmungen, Abfluss und Dürreereignisse, insbesondere auf regionaler und lokaler Ebene (PENG et al., 2021). Fernerkundungstechniken im optischen, thermischen und Mikrowellenbereich werden aufgrund ihrer starken Korrelation mit der Reflexion elektromagnetischer Strahlung häufig zur Überwachung der Bodenfeuchtigkeit eingesetzt (BABAEIAN et al., 2019). Im Rahmen des EXDIMUM-Projektes erfolgte eine Kombination optischer und SAR-Daten mit Umweltvariablen wie Topografie und Klimafaktoren, um die Schätzung der Bodenfeuchte zu verbessern.

Optische Indizes aus PlanetScope-Multispektraldaten geben Aufschluss über die Vegetationsbedingungen und die Oberflächen-

reflexion, während aus der SAR-Rückstreuung der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens erfasst werden kann. Durch die Integration dieser verschiedenen Datensätze wurde ein umfassender Satz von Merkmalen geschaffen, der sowohl hydrologische als auch radiometrische Eigenschaften der Harzregion darstellt. Da nur wenige Referenzdaten vorlagen, kam ein Ansatz des selbstüberwachten Lernens (SSL) zur Anwendung. Anders als herkömmliche überwachte Modelle, die auf großen Referenzdatensätzen beruhen, lernt das Modell dabei Merkmalsrepräsentationen aus Fernerkundungs- und Umweltdaten, ohne auf Referenzdaten zurückzugreifen. Durch eine Strategie der maskierten Merkmalsrekonstruktion, bei der ein Teil der eingegebenen Merkmale während des Trainings zufällig maskiert wird, konnte das Modell lernen, fehlende Werte zu rekonstruieren, um wichtige räumliche und zeitliche Bodenfeuchtmuster zu erfassen. Die Referenzdaten stammen vom TERENO-Netzwerk (Terrestrial Environmental Observatories), das zwischen Februar 2017 und Dezember 2023 kontinuierliche Bodenfeuchtheitsdaten von Cosmic-Ray Neutron Probes (CRNPs) lieferte. Aus den Satellitendaten werden 18 Parameter abgeleitet.

Der prädiktive Kern des Modells ist ein sogenannter TabTransformer, der auf selbstüberwachte Weise trainiert wird. Jeder der 18 Prädiktoren wird zunächst durch eine dichte lineare Schicht in einen gemeinsamen latenten Raum eingebettet. Ein Stapel von Transformator-Kodierschichten erfasst dann nichtlineare Wechselwirkungen zwischen optischen, Radar-, topografischen und klimatischen Merkmalen. Während der selbstüberwachten Phase wird ein fester Anteil der Eingabemerkmale nach dem Zufallsprinzip maskiert, und das Netz hat die Aufgabe, die fehlenden Werte zu rekonstruieren. Dieser Prozess zwingt das Modell dazu, eine Darstellung zu erlernen, die Spektralradarmuster mit meteorologischen und Geländemerkmale verknüpft. Nach dem Vortraining werden die Gewichte des Kodierers eingefroren und ein flacher Multilayer-Perceptron-Regressionskopf zur Feinabstimmung mit den In-situ-Bodenfeuchtedaten im Harzer Einzugsgebiet hinzugefügt.

Die Quantifizierung der räumlich-zeitlichen Bodenfeuchtedynamik erfolgte mittels einer Leave-One-Year-Out-Cross-Validation-Strategie. Für jedes Kalenderjahr zwischen 2017 und 2023 wurden in je einer Iteration alle Datensätze aus diesem Jahr zurückgehalten und dienten ausschließlich der Auswertung, während die restlichen 6 Jahre die Daten für das Modelltraining und die Validierung lieferten. Dieses Verfahren führte zu 7 unabhängigen Testsätzen und ermöglichte es, die zeitliche Übertragbarkeit des Modells zu bewerten.

Als Grundlage für die Untersuchung von Abfluss und Überflutung im zeitlichen Verlauf diente das hochaufgelöste digitale Geländemodell der Gitterweite 1 m (DGM1) aus den Daten des Landes Niedersachsen (LGLN, 2022).

4.2 Terrestrische Sensorik

Die Erfassung von hydrologisch relevanten Parametern wie Pegelständen, Bodenfeuchte und Niederschlägen an relevanten Standorten in hoher zeitlicher Auflösung stellt einen zentralen Aspekt für die Modellierung dar. Die terrestrische Erfassung der Messwerte ermöglicht dabei einerseits das Erkennen und Auswerten der aktuell vorherrschenden Situation, wodurch im Falle von Extremwetterereignissen eine schnelle und umfassende Aufklärung der beteiligten Akteure erfolgen kann und Gegenmaß-

**Abbildung 6**

Prototyp des optischen Sensors zur Überwachung des Zustands kritischer Abflussgitter.
Prototype of optical sensor for monitoring the status of critical culverts.

nahmen eingeleitet werden können. Andererseits ermöglichen die gesammelten Daten auch die Kalibrierung und Validierung hydrologischer Modelle und tragen damit zu deren Weiterentwicklung bei. So wurden unter anderem für konkrete Regenereignisse im Projektzeitraum hydrodynamische Simulationen durchgeführt. Diese können mithilfe der erhobenen Sensordaten validiert werden.

4.2.1 Drahtloses Sensornetzwerk

Um die terrestrischen Parameter zu erfassen, wurde ein drahtloses Netzwerk bestehend aus mehreren Messstationen an relevanten Standorten ausgebracht. Zu den erfassten Messgrößen gehören Pegelstände, Niederschlagsmengen, Bodenfeuchte, Temperatur, Luftfeuchte sowie der Luftdruck.

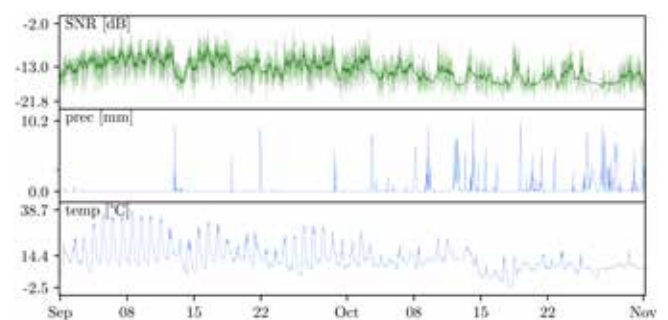
Da es für die Überwachung von Abflussgittern für Flüsse und Bäche noch keine Monitoring-Sensorik über Netzwerke wie das „Long Range Wide Area Network“ (LoRaWAN) gibt, wurde ein weiterer Sensor vom Projektpartner DSI Aerospace im Rahmen von EXDIMUM entwickelt. Das Gerät überwacht zusätzlich zu Pegelständen auch den Status von kritischen Abflussgittern (Abb. 6). Hierfür wurde eine eigene Ultra-Low-Power-Lösung gefertigt, die möglichst stromautark arbeiten kann.

Die Sensordaten werden in regelmäßigen Zeitintervallen von 10 Minuten erfasst und mittels des LoRaWAN-Protokolls verschickt. Das Protokoll erlaubt eine energieeffiziente drahtlose Übertragung der Messdaten, wodurch ein kontinuierlicher Betrieb von mehreren Monaten bis Jahren ermöglicht und der Wartungsaufwand minimiert wird.

4.2.2 Zuverlässige Datenübertragung

Die Zuverlässigkeit der drahtlosen Datenübertragung ist bei der Monitoring-Sensorik von zentraler Bedeutung, da sie im

Falle von extremen Wetterereignissen ermöglicht, die aktuellen und relevanten Parameter in situ zu bewerten und über potenzielle Gegenmaßnahmen und deren Intensität zu entscheiden. Trotz zuverlässiger Funktionsweise im Regelbetrieb zeigten sich Datenausfälle unter erschwerten Wetterbedingungen wie Starkregen (SZAFRANSKI & REINHARDT, 2023b). So führt Abbildung 7 beispielhaft die Signalqualität sowie Niederschlags- und Temperaturdaten zwischen den Monaten September und November 2023 auf. Diese wird, gemessen am Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise-ratio, SNR) als dreistündiger gleitender Mittelwert in dunkelgrün dargestellt. Es ist dabei zu beobachten, dass das SNR während Regenphasen sinkt. Ebenso treten auch Datenverluste auf, was sich durch weniger dichte Messpunkte manifestiert. Während der Regenperioden am 12. Oktober sowie am 26. Oktober ist dies besonders sichtbar.

**Abbildung 7**

Signalqualität des optischen Abflussgitter-Sensors sowie Niederschlags- und Temperaturdaten, beispielhaft zwischen dem 1. September und dem 1. November 2023.

Signal quality of the optical culvert sensor as well as precipitation and temperature data, exemplarily between September 1st and November 1st, 2023.

Durch eine ausführliche Analyse mehrerer Geräte über eine Zeitdauer von einem Jahr konnte nachgewiesen werden, dass die vorherrschenden Wetterbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Signalqualität haben und zu Datenausfällen führen können (SZAFRANSKI, 2024). Insbesondere war ein negativer Einfluss von Niederschlägen, Luftfeuchtigkeit und Temperatur auf die Empfangsstärke feststellbar, d. h. auf Received Signal Strength Indication (RSSI) und SNR. Analog zu den täglichen Schwankungen der Wetterparameter war ebenfalls eine 24-stündige Periodizität der Empfangsqualität zu beobachten. Basierend auf den gemessenen Umweltdaten wurden verschiedene Regressionsmodelle trainiert und getestet, welche die Empfangsstärkeparameter vorhersagen konnten. Dies ermöglicht es, bereits auf dem Sensorgerät die Empfangsstärkeparameter zu schätzen und ggf. Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Als Maßnahme und Prävention gegen den Datenverlust wurde das Konzept der konstruktiven Interferenz untersucht, bei dem mehrere Sensorgeräte zeitsynchron Daten versenden (SZAFRANSKI et al., 2022). Durch die Überlagerung der Signale kommt es dabei zu Phasen einer additiven Überlagerung, welche die Signalstärke erhöhen, jedoch ebenfalls zu Phasen destruktiver Überlagerung mit abgeschwächter Signalstärke. Dieser Effekt, bekannt als „Schwebung“, führt dazu, dass sich das Konzept nicht ohne Adaption zuverlässig in der Praxis einsetzen lässt. Durch eine zusätzliche Modulationsebene, „ELORA“, konnte jedoch ein Protokoll entwickelt werden, welches trotz der Schwebung die Phasen konstruktiver Interferenz nutzt, um ein stärkeres Signal zu erhalten und dadurch die Widerstandsfähigkeit gegen Wettereffekt zu erhöhen (SZAFRANSKI & REINHARDT, 2023a).

5 Modellierung

5.1 Hochauflösende, dynamische Abflussmodellierung

Die Entwicklung effizienter und stabiler Werkzeuge für die hydrodynamische Modellierung ist seit Jahrzehnten ein aktiver Bereich, sowohl in der Forschung als auch in der Produktentwicklung (HUNTER et al., 2008). Dabei ist die Verwendung eines hochauflösenden Höhenmodells wichtig für die Erfassung von Geländedetails, die einen großen Einfluss auf das Abflussverhalten des Oberflächenwassers haben können (HARDY et al., 1999). Die Nutzung von hochauflösenden Daten in hydrodynamischen Simulationen ist allerdings sehr rechenintensiv, was ihren Einsatz bei größeren Gebieten speziell in Frühwarnsystemen erschweren kann (JIBHAKATE et al., 2023; BRADBROOK et al., 2005). Entsprechend gibt es bereits zahlreiche Werkzeuge, die unterschiedliche Kompromisse zwischen Modellierungsdetails, Vorverarbeitungszeit und Berechnungszeit bieten. Einige Verfahren vereinfachen dabei das physikalische Modell, um die Einrichtungs- und Berechnungszeit erheblich zu reduzieren, während andere Verfahren den Details im physikalischen Modell Vorrang vor der Zeit geben, die für die Einrichtung, Kalibrierung und Ausführung des hydrodynamischen Modells aufgewendet wird.

Neben dem reinen Höhenmodell verwendet EXDIMUM eine Reihe weiterer Daten. Dazu gehören Gebäudeumrisse und Straßen aus amtlichen Datensätzen sowie öffentlichen Quellen wie OpenStreetMap, aber auch Durchlässe aus dem amtlichen digitalen Basis-Landschaftsmodell sowie Landnutzungs-, Bodentyp- und Bodenfeuchtedaten aus anderen Projektteilen und

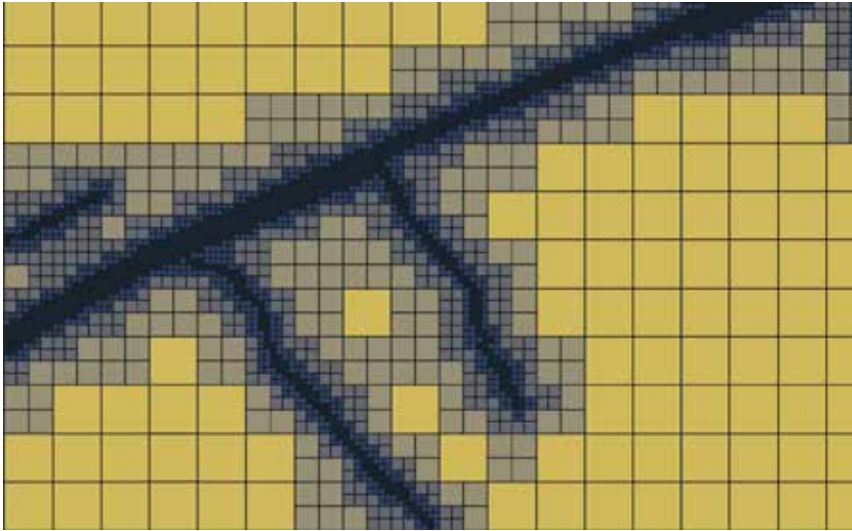
Pegelstände von Seen und Rückhaltebecken. Diese Daten dienen als Eingabe für das hydrodynamische Modell, welches ein Horton-Modell für die Modellierung der Infiltration umfasst. Neben interpolierten Niederschlagsdaten von Niederschlagssensoren aus anderen Projektteilen wurden Regendaten aus dem Datensatz „Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (KOSTRA)“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt, um verschieden starke Extremereignisse zu simulieren. Außerdem zum Einsatz kamen Sensordaten zur Wetterlage und Pegelstände zur Kalibrierung und Validierung des Modells.

Zur Berechnung von kombinierten 1D- und 2D-Simulationen wird in EXDIMUM die kommerzielle Software HPC (Heavily Parallelized Compute) der Firma TUFLOW genutzt. TUFLOW HPC ist eine hydrodynamische Modellierungssoftware und arbeitet in der Regel mit fester Gittergröße. Der Solver liefert eine explizite Finite-Volumen-Lösung zweiter Ordnung im Raum und vierter Ordnung in der Zeit. Die Software verwendet zusätzlich adaptive Zeitschritte mit der Möglichkeit, im Falle einer numerischen Inkonsistenz in der Zeit zurückzugehen, wodurch ein hohes Maß an numerischer Stabilität erreicht wird. Dieser Ansatz löst die vollständigen 2D-Flachwassergleichung für freie Oberflächen, einschließlich der Trägheits- und Turbulenzterme (Wirbelviskosität). Das Modell schließt Gebäude aus, indem es Gebäudeumrisse mithilfe geeigneter Randbedingungen als unendlich hohe Wände simuliert. An den Außenrändern der Modellregion wird das Wasser entweder mit geeigneten Randbedingungen entfernt oder, im Fall ebenfalls simulierter Nachbarregionen (Kap. 5.1.2.), es wird auf Basis der Steigung am Rand eine Beziehung zwischen Abflussmenge und Wasserhöhe berechnet und angewendet.

Die Landnutzungsdaten definieren verschiedene Rauheitsbeiwerte für unterschiedliche Bereiche des Geländes. Die verwendeten Strickler-Beiwerte stammen von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Bodenfeuchtedaten aus der KI-Modellierung werden außerdem für die Ableitung eines Grundwasserspiegels im Horton-Infiltrationsmodell genutzt. Die Horton-Parameter wurden auf der Grundlage der Bodenart und des Verdichtungsgrads des Bodens festgelegt. Die Bodenarten stammen von dem Unternehmen SCALGO, wofür wiederum die Bodenarten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe modifiziert und mithilfe anderer Datenquellen aufbereitet wurden (SCALGO, 2025).

5.1.1 Quadtree und räumlich variable Auflösung

Die für ein akkurates Ergebnis benötigte räumliche Auflösung ist an manchen Stellen wesentlich höher als an anderen. Die Simulation der gesamten Region in der höchsten benötigten Auflösung wäre so rechenintensiv, dass großskalige Szenarien nicht ohne Weiteres behandelt werden könnten. Daher unterstützen manche hydrodynamische Analyseprogramme die Darstellung des Geländes mit ungleichmäßiger Auflösung. So nutzt TUFLOW eine Quadtree-Datenstruktur, um Zellen in unterschiedlicher Auflösung zu simulieren (GAO et al., 2020). Dabei wird eine grobe Basisauflösung für alle Zellen festgesetzt und dann für bestimmte Teilgebiete gezielt verfeinert. Die Zellen in der Basisauflösung werden dann rekursiv geviertelt, um die gewünschte Auflösung in den Zielgebieten sicherstellen zu können (Abb. 8). So lässt sich die Anzahl zu simulierender Zellen – und damit die Rechenzeit – drastisch verringern. Um eine hohe Genauigkeit auch für niedrig aufgelöste Zellen gewährleisten zu können, wird

**Abbildung 8**

Quadtree-Datenstruktur mit höheren Auflösungen entlang einer Straße.
Quadtree data structure with higher resolutions along a road.

außerdem Subgrid-Sampling genutzt. Hierbei werden auch feiner aufgelöste Höhendaten in der Simulation, zum Beispiel bei der Berechnung des benetzten Umfangs, verwendet.

Das Projekt setzte verschiedene Methoden ein, um automatisch die an verschiedenen Stellen zu verwendende Auflösung zu bestimmen. So werden Bereiche um die Einlässe von Durchlässen sowie in der Nähe von Straßen und Gerinnen mit einem Einzugsgebiet oberhalb eines gewissen Schwellwerts im statischen senkungsfreien Abfluss mit der höchsten verfügbaren Auflösung simuliert. Außerdem wird die Auflösung in der Nähe von Gebäuden erhöht.

5.1.2 Unterteilung des simulierten Bereichs

Neben einer relativ feinen Unterscheidung zwischen Bereichen mit höherer und niedriger Auflösung lässt sich auch eine räumlich deutlich gröbere Unterteilung der gesamten Region in ein relevantes Kerngebiet und weniger relevante Randbereiche vornehmen. So sind die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit in bewohnten Gebieten relevanter für die Gefahrenabwehr als in völlig unbewohnten Gelände; auf entferntes, unbewohntes Gelände fallender Niederschlag wird erst dadurch relevant, dass dieser zur in das Kerngebiet einströmenden Wassermenge beiträgt oder die aus dem Kerngebiet ausströmende Wassermenge beschränkt.

Diese Beobachtung erlaubt es, den gesamten Einzugsbereich der untersuchten Region, für den eine genaue Simulation sowohl vom Rechenaufwand als auch vom Speicheraufwand her nicht praktikabel wäre, anhand des statischen senkungsfreien Abflusses zu segmentieren. Dabei kann ein hydrologischer Abhängigkeitsgraph zwischen den Teilgebieten genutzt werden, um die Reihenfolge der Teilsimulationen im Sinne einer durch den Graphen induzierten partiellen Ordnung festzulegen.

Für Bereiche außerhalb des Kerngebiets ist es dann möglich, unterschiedliche Niederschlagsszenarien mit niedriger Auflösung zu simulieren. Die Ergebnisse dieser Simulationen können dann genutzt werden, um die tatsächlich genau zu simulierende

Region auf den relevanten Kernbereich zu beschränken und die exakte Simulation der Randbereiche durch Interpolation zwischen den vorberechneten Szenarien zu ersetzen, welche letztlich als Randbedingungen das in die Kernregion einfließende Wasser darstellen.

Um die Korrektheit der Ergebnisse gewährleisten zu können, ist die Auswahl der Randbedingungen zwischen den verschiedenen Simulationen essenziell. Kritische Übergangsbereiche werden anhand des statischen senkungsfreien Abflusses identifiziert und Randbedingungen definiert, die einen kontrollierten Abfluss in die Nachbarregion erlauben. Diese Ränder definieren den möglichen Abfluss über eine Wasserstand-Abfluss-Kurve, die mithilfe der lokalen Steigung entlang des Abflussgraphen abgeschätzt wird. In der Simulation des Nachbargebiets kann dann entlang desselben Randstücks eine Abflussganglinie definiert

werden, um das einströmende Wasser möglichst realistisch zu simulieren.

5.2 Hydrologische Modellierung mit SWAT+

SWAT+ ist die neueste Version des hydrologischen Modells SWAT (ARNOLD et al., 1998; BIEGER et al., 2017). Die Umstrukturierung von SWAT zu SWAT+ ermöglicht eine höhere Flexibilität unter anderem hinsichtlich der Abbildung von Landschaftseinheiten (WAGNER et al., 2022). Die Berechnungen des Modells basieren auf Hydrotopen (hydrological response units), d. h. Einheiten gleicher Landnutzungs-, Boden- und Neigungsklasse. Damit ist das Modell insbesondere für die Untersuchung der Auswirkungen von dynamischen Landnutzungsänderungen auf die Hydrologie geeignet (WAGNER et al., 2019).

In EXDIMUM wird SWAT+ für die Untersuchung der Auswirkungen des Baumsterbens auf die Hydrologie verwendet. Hierbei gehen insbesondere die Landnutzungsklassifikationen aus der Fernerkundung dynamisch in die Modellierung ein. Dazu greift das Modell auf fernerkundungsbasierte Klassifikationen der Landnutzung und des Baumsterbens zurück. Insbesondere bildet das SWAT+-Modell die Einzugsgebiete von Gose und Abzucht oberhalb der Stadt Goslar ab (WAGNER et al., 2025).

6 Ergebnisse

6.1 Hochauflösende dynamische Abflussberechnung

Ein zentrales Ziel des Projekts EXDIMUM war es, mithilfe des dynamischen Abflusses für das Modellgebiet Gefahrenkarten zu erstellen und so Vorhersagen auf Basis der aktuellen Messungen durchführen zu können. Außerdem sollten Ansätze zur Verbesserung der Laufzeit getestet und validiert werden, mit dem Ziel der prinzipiellen Echtzeitfähigkeit, d. h. Berechnungszeiten, die unter der Länge der simulierten Ereignisse liegen. Durch die Verknüpfung von Geländedaten, Landnutzungs-, Bodentyp- und Bodenfeuchtedaten aus anderen Projektteilen und Pegelstände von Seen und Rückhaltebecken ist es bereits gelungen, historische Ereignisse zu simulieren. Um genaue Vorhersagen

zu aktuellen Extremwetterlagen in Zukunft in skalierbarer Weise gewährleisten zu können, wurden im Projekt verschiedene Ideen zur Verbesserung der Laufzeiten der zugrundeliegenden Modelle untersucht. Dazu gehören unter anderem die in Kapitel 5.1 vorgestellten adaptiven Auflösungen.

Ziel war es, die Geschwindigkeit und numerische Stabilität von bestehenden hydrodynamischen Modellen durch Modifikation des Eingabe-Geländemodells deutlich zu verbessern und gleichzeitig die Auswirkungen dieser Modifikationen auf das Ergebnis des Modells zu begrenzen (Abb. 9). Ausgewertet wurden hier zwei verschiedene Modelle: zum einen eines mit einer Auflösung von 1 m, zum anderen ein 8-m-Modell mit adaptiver Auflösung anhand von Geländeeigenschaften, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Die Auswertungen anhand eines konkreten Regenereignisses zeigen fast identische Ausgaben des 1-m- und des 8-m-Modells, wobei sich die Laufzeit durch die Nutzung der adaptiven Auflösung mehr als halbierte. Eine umfassende Analyse der untersuchten Verfahren und Details zu den getesteten Verbesserungen unternehmen PERK et al. (2025).

Zusätzlich zu den bisherigen Analysen wurden auch Simulationen für verschiedene Regenereignisse aus dem KOSTRA-Datensatz durchgeführt. So stellt beispielsweise Abbildung 10 die Simulationsergebnisse für ein 5-jähriges und ein 50-jähriges Regenereignis gegenüber. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem 5-jährigen Ereignis die betroffenen Fließwege und Überflutungsflächen weitgehend innerhalb der vorhandenen Gewässerstrukturen bleiben, während das 50-jährige Ereignis zu großflächigen Überschwemmungen mit erheblich höheren Wasserständen auch innerhalb der Stadt Goslar führt. Historische Ereignisse wie die Extremwetterlage zwischen dem 24. und 26. Juli 2017 wurden bereits simuliert und mit anekdotischen Aufnahmen wie Videos und Fotos plausibilisiert. Die Simulationen scheinen die Realität an kritischen Punkten akkurat abzubilden. Eine systematische Validierung mit den tagesaktuellen Sensordaten ist aktuell in Arbeit.

6.2 LULC-Wandel, seine hydrologischen Auswirkungen und Bodenfeuchtekarten

Die „Land-use, Land-cover“- (LULC)-Klassifizierung erreichte in der Modellierung eine Gesamtgenauigkeit von 0,88, wie aus der Konfusionsmatrix hervorgeht. Die Auswertung anhand von Testdaten, d. h. Flächen, die beim Training des Algorithmus nicht verwendet wurden, ergab konsistente Ergebnisse, wobei Ackerland die höchste Vorhersageleistung erzielte ($F1 = 0,97$). Während die meisten Klassen $F1$ -Werte über 0,70 erreichten, war die Leistung bei der Erkennung von Flächen mit toten Bäumen geringer ($F1 = 0,69$). Dies ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass Totholzbereiche meist klein im Vergleich zur Umgebung sind und wegen der Bodenpixelgröße von 10 m erst größere Cluster segmentiert werden können.

Im Detail zeigt sich von 2018 bis 2023 eine Ausdehnung von abgestorbenen Baum- und Grünlandflächen, vor allem auf Kosten von Nadelwäldern. Dieser Trend steht in engem Zusammenhang mit der durch Borkenkäferbefall verursachten Baumsterblichkeit (KNAPP et al., 2024), während die Zunahme der Grünlandflächen auf das Wiederaufwachsen von Zonen zurückzuführen ist, die zuvor von abgestorbenen Bäumen dominiert wurden und folglich richtigerweise als Grünland klassifiziert

sind. Darüber hinaus wurden zwischen 2018 und 2023 Entwaldungstendenzen festgestellt, wobei sich die Totholzzonen zunächst in der Nähe des Brockens im Harz konzentrierten und sich von Südosten her allmählich auf die westlichen und zentralen Teile des Untersuchungsgebiets ausdehnten (Abb. 6, oben), was auch in den Fokuseinzugsgebieten zu beobachten ist (WAGNER et al., 2025; SABA et al., 2025 für weitere Einzelheiten).

Die Modellierung der Bodenfeuchte ergab eine Güte der Anpassung von 0,65 R^2 und 0,042 m^3/m^3 RMSE (rooted mean square error) für das bewaldete Harzeinzugsgebiet. Hierbei ist R^2 das Bestimmtheitsmaß, welches angibt, wie gut ein Modell die Varianz der Parameter vorhersagen kann. Die mittlere quadratische Abweichung ist ein Maß für die Streuung der Feuchtigkeitswerte um die Referenz. Der TabTransformer behält eine angemessene Genauigkeit bei, selbst wenn er mit unbekannten hydrologischen Jahren konfrontiert wird, was seine Eignung für die großmaßstäbliche Abschätzung der Bodenfeuchte in datenarmen Regionen beweist. Im unteren Teil von Abbildung 11 ist beispielhaft eine Bodenfeuchtekarte dargestellt, wie sie im Dashboard (Kap. 6.3) angezeigt wird.

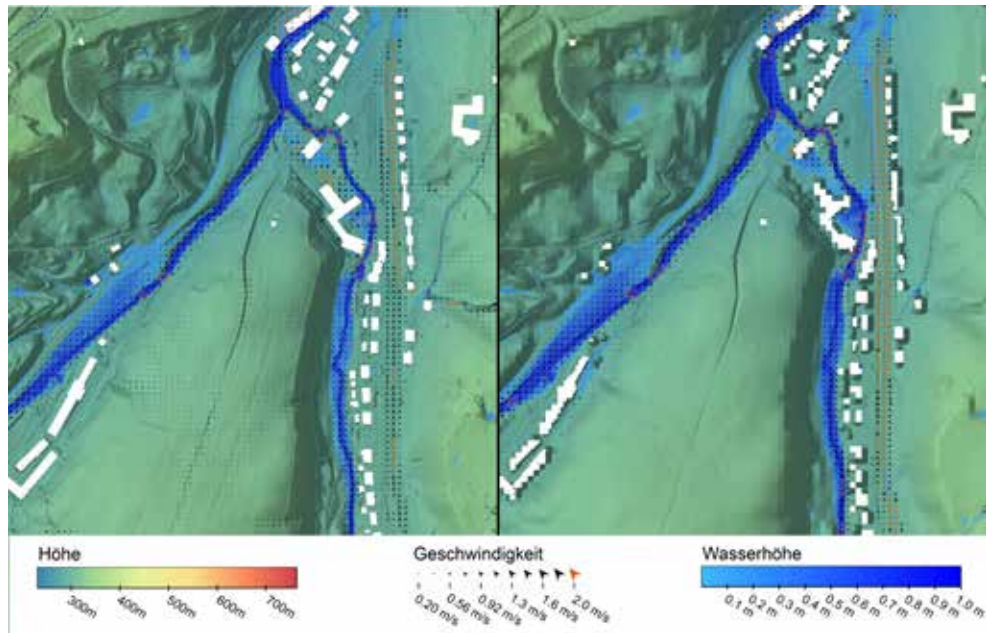
Die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung zeigen eine mit zunehmendem Baumsterben abnehmende Evapotranspiration – insbesondere während der Vegetationsperiode. Gleichzeitig nimmt der Oberflächenabfluss zu, was zu einer schnelleren Reaktion der Einzugsgebiete führt. Die räumlichen Muster belegen einen deutlichen Einfluss der Schadflächen auf die Wasserhaushaltskomponenten sowie die Bodenerosion; insgesamt verstärkt der LULC-Wandel die hydrologischen Extreme im Harz. Eine detaillierte Darstellung und Analyse der Modellierungsergebnisse liefern WAGNER et al. (2025).

6.3 Visualisierung

Wichtig für die praktische Nutzbarkeit ist nicht zuletzt eine verständliche, visuelle Darstellung der erzielten Daten und Simulationsergebnisse. Für die zielgerichtete Umsetzung wurde im bereits erwähnten Netzwerk eine Umfrage durchgeführt, um Feedback zur Darstellung der Daten zu sammeln. Ergebnisse dieser Umfrage werden verwendet, um iterative Anpassungen an der Programmierung des Dashboards vorzunehmen und eine praxisrelevante Visualisierung zu generieren.

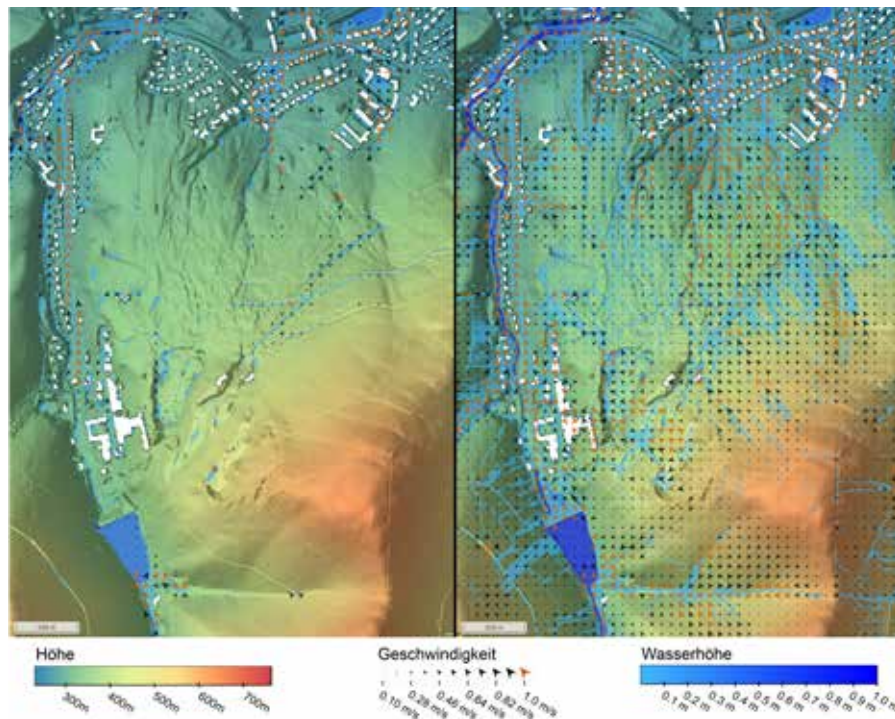
In der grafischen Oberfläche dient eine Karte der Projektregion als Grundelement, in der Bereiche (Polygone) hervorgehoben sind. Das grafische System ist modular aufgebaut, auf verschiedenen Ebenen der Karte werden jeweils unterschiedliche Informationen und Polygone der Projektregion abgebildet. Die Polygone beruhen auf der Topographie und werden mittels eines Algorithmus anhand der Karteninformation erstellt. Ihre Größe ist definiert durch die angestrebte Auflösung. Die aus dem Projekt gewonnenen Informationen und Messdaten aus Fernerkundung, terrestrischen Sensoren und Modelldaten werden in das GeoJSON-Format überführt und anhand ihrer Koordinaten einem Polygon zugeordnet, verarbeitet und in die vorgesehenen Ebenen eingefügt.

Die vektorbasierte Karte erlaubt eine hohe Auflösung und stellt Informationen zu den Polygonen bereit, die zusätzlich in einem Popup-Fenster angezeigt werden. Ihre Layer sind unabhängig voneinander und können auch zielgruppenspezifisch freigegeben

**Abbildung 9**

Simulation des Oberflächenabflusses eines vierstündigen Starkregenereignisses durch unterschiedliche Auflösungen auf einem Gebiet von 22 km². Dargestellt sind Maximalwerte der Wassertiefe und Geschwindigkeit im südlichen Teil der Stadt Goslar. In blau eingefärbten Bereichen befindet sich mehr als 3 cm Wasser. Links: 1 m Auflösung mit 15 h Rechenzeit. Rechts: Auflösung von 8 m mit adaptiver Auflösung von bis zu 1 m bei Straßen, Gerinnen und Durchlässen mit einer Rechenzeit unter 7 h.

Simulation of the surface runoff of a four-hour heavy rainfall event at different resolutions over an area of 22 km². The images show maximum water depth and velocity, with blue areas indicating water depths greater than 3 cm. Left: 1 m resolution with more than 15 h of computing time. Right: Resolution of 8 m with adaptive resolution of up to 1 m for roads, channels and culverts with a computing time < 7 h.

**Abbildung 10**

Simulation des Oberflächenabflusses eines vierstündigen Starkregenereignisses durch unterschiedliche Auflösungen auf einem Gebiet von etwa 450 km². Dargestellt sind Maximalwerte der Wassertiefe und Geschwindigkeit in einem kleinen Teilbereich. In blau eingefärbten Bereichen befindet sich mehr als 1 cm Wasser. Links: ein 5-jähriges Regenereignis; rechts: ein 50-jähriges Regenereignis.

Simulation of surface runoff for a four-hour heavy rainfall event at different resolutions over an area of about 450 km². The images show maximum water depth and velocity, with blue areas indicating water depths greater than 1 cm. Left: a 5-year rainfall event; right: a 50-year rainfall event.

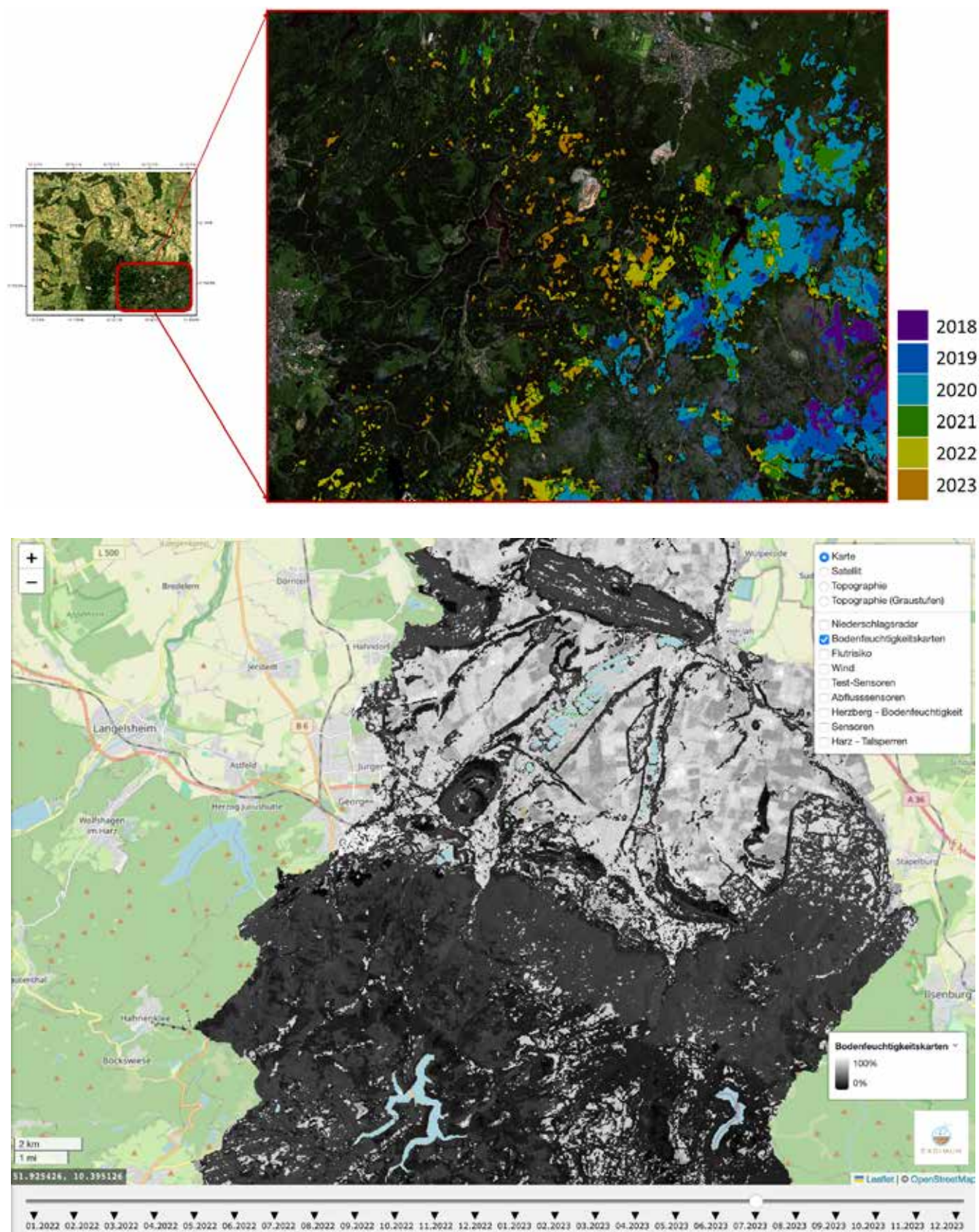


Abbildung 11

Oben: Karte des Vorkommens abgestorbener Bäume in den Jahren 2018 bis 2023, überlagert mit einem Sentinel-2-Bild. Unten: Dashboard (Kap. 6.3.), in dem die Bodenfeuchtedaten in einer Graustufendarstellung pro Monat abrufbar sind – hier beispielhaft Juli 2023.

Top: map of dead-tree occurrences for 2018 to 2023 overlaid on a Sentinel-2 image. Bottom: dashboard (Ch. 6.3) which provides monthly soil-moisture data in greyscale, shown here for July 2023.

werden. Die Datenübertragung ist mittels Programmierschnittstellen (APIs), insbesondere „representational state transfer“- (REST)-APIs, umgesetzt. Anschließend laufen die Daten auf einem Server zur Validierung und Visualisierung in Quasi-Echtzeit zusammen. In Abbildung 12 sind exemplarisch einige Sensordaten aufgeführt, die die Situation im Projektgebiet zur Zeit der Aufnahme darstellen.

6.4 Nutzung des Sensornetzwerkes beim Hochwasser im Dezember 2023

Das Dashboard bildet aktuell die Grundlage für die Umsetzung von Maßnahmen zum Schutz vor starkregenbedingtem Hochwasser in der Stadt Goslar, wobei nicht nur der Netzbetreiber, sondern u. a. auch die Untere Wasserbehörde der Stadt Goslar die Daten zum Abgleich mit eigenen Prognosen nutzen. Das Starkregenereignis zu Weihnachten 2023 im Harz führte zum ersten starken Hochwasser seit der Inbetriebnahme des Sensornetzes. Dabei konnten die aus dieser Situation auf Basis der Sensordaten gewonnenen Erkenntnisse in betriebliche Maßnahmen umgesetzt werden, die einen deutlichen Mehrwert boten.

Die Anwendung der Sensorik führte durch Beobachtungen während des Starkregenereignisses zu einem vertieften Verständnis der Einzugsgebietscharakteristik und ermöglicht eine frühzeitige Einschätzung der Überflutungsgefahr, indem Abhängigkeiten zwischen Parametern identifiziert und qualifiziert wurden.

Ein starker Niederschlag im Einzugsgebiet verursacht einen verzögerten Anstieg der Pegelstände. Der Mehrwert des neu eingerichteten Systems besteht darin, den genauen Zusammenhang nicht erst im Nachhinein, sondern in Echtzeit erfassen zu können. Anstatt subjektiver und sporadischer Momentaufnahmen vor Ort, z. B. an Rückhaltebecken, Rechenanlagen, Bergrosten, Wasserläufen und Dämmen, konnte aus der Leitzentrale heraus der Verlauf wichtiger Parameter beobachtet und mit betrieblichen Maßnahmen darauf reagiert werden. Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) nutzen die zur Verfügung gestellten Daten, um kurzfristig die Errichtung von mobilen Dämmen und anderen Schutzvorrichtungen zur Verhinderung von Überflutung zu planen. Außerdem konnten die begrenzt zur Verfügung stehenden Einsatzkräfte gezielt an den Stellen eingesetzt werden, wo sie besonders effektiv einer Überflutung vorbeugen oder Menschen in Gefahrensituationen helfen konnten.

Es hat sich gezeigt, dass im Gebiet des Harzes die Regelung von Retentionsräumen im Hochwassermanagement eine große Rolle spielt. Durch die punktgenaue Messung von Füllständen und die daraus ermittelten Prognosen ist eine effektive Steuerung der untereinander abhängigen Retentionsräume möglich. Die Abschätzungen und Kontrollen durch Personen vor Ort ohne Nutzung der Sensordaten war mit Gefahren wie dem Verpassen kritischer Punkte verbunden. Die permanente Überwachung und die daraus rekonstruierbaren genauen Pegelstandverläufe

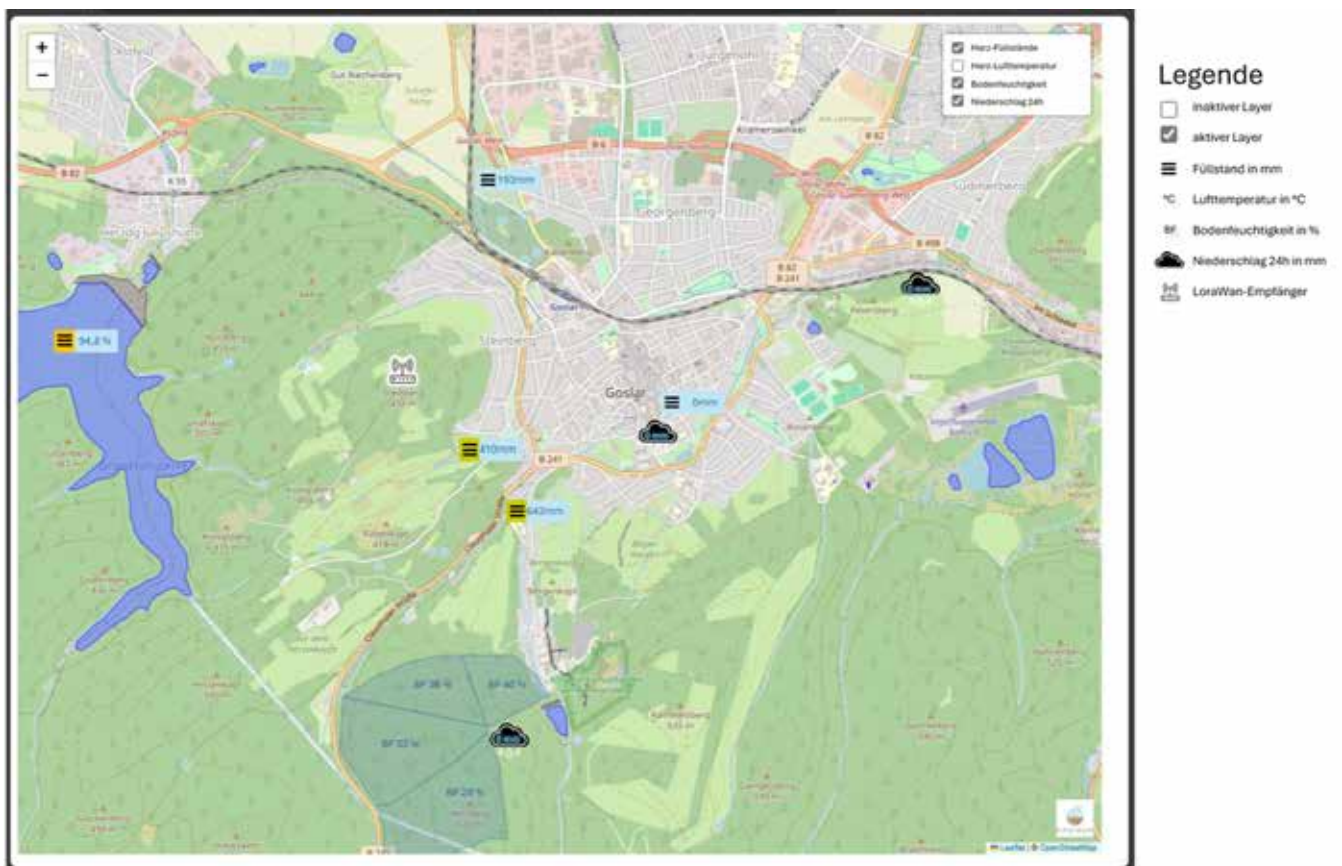


Abbildung 12

Exemplarische Darstellung der Daten im Dashboard.
Exemplary data visualization in the dashboard.

hingegen ermöglichen es, Drosselabflüsse variabel an die aktuellen Gegebenheiten, wie den Füllstand und die Situation flussabwärts, anzupassen und das Anspringen des Notüberlaufs zu vermeiden oder zumindest hinauszuzögern.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Zuge des Klimawandels stehen die Betreiber kommunaler Wassernetze nicht nur vor der Problematik akuter Notsituationen, sondern auch vor der Aufgabe, die mittel- und langfristige Gestaltung der Infrastruktur für die Wasserversorgung mit dem Schutz der gesamten Kommune zu verbinden. Dabei gleichen sich entgegengesetzte Extreme wie anhaltende Dürre und kurzfristige Überflutung nicht aus, sondern können sich in ihren Auswirkungen sogar verstärken. Dies erfordert die Betrachtung auf verschiedenen Skalen, die Kombination verschiedener Expertise und die Zusammenarbeit zwischen Praxis und Wissenschaft, wie es in Projekten wie EXDIMUM geschieht.

Im Rahmen des Projekts EXDIMUM wurden im Einzugsgebiet von Goslar Methoden zur digitalen Erfassung, Modellierung und Visualisierung von Extremwetterereignissen praxisnah erprobt. Die Kombination von Fernerkundungsdaten, drahtloser Sensorik und adaptiver hydrodynamischer Modellierung ermöglicht verbesserte Karten zu Landnutzungswandel, Bodenfeuchte und Baumsterben sowie eine deutlich effizientere Simulation von Starkregenabflüssen bei gleichbleibender Genauigkeit. Ein Dashboard verknüpft Fernerkundungs-, Sensor- und Modelldaten und erleichtert die operative Handhabung und Darstellung.

Die Praxistauglichkeit dieser Ansätze wurde insbesondere während des Hochwassers im Dezember 2023 deutlich: Das Sensornetzwerk und die aufbereiteten Daten unterstützten eine optimierte Maßnahmenplanung in der Gefahrenabwehr. Mittel- und langfristig helfen die Methoden und Ergebnisse, Retentionsanlagen an optimalen Standorten zu planen oder die Wiederaufforstung an kritischen Stellen zu priorisieren.

Da die klimatischen Veränderungen und ihre Folgen nicht nur anhalten, sondern auch weiter zunehmen werden, ist zu erwarten, dass auch die entsprechenden Schwierigkeiten in ihrer Häufigkeit weiter zunehmen und in ihren Dimensionen wachsen. Da die zur Verfügung stehenden Ressourcen zur Katastrophenvorsorge und -bekämpfung nicht beliebig erhöht werden können, liegt eine besondere Herausforderung in der Entwicklung von Methoden, die nicht nur möglichst gute Simulationen zu erwartender Abläufe erlauben, sondern auch die Identifikation möglichst wirksamer Maßnahmen ermöglichen, um Verläufe positiv beeinflussen zu können. Dafür betrachtet das Projekt EXDIMUM aktuell Ansätze zur Stabilitätsanalyse, um kritische Konstellationen zu erkennen, in denen Eingriffe von begrenztem Umfang einen großen Effekt haben können.

Summary and Conclusions

In the course of climate change, the operators of municipal water networks are not only faced with the problem of acute emergency situations, but also with the task of combining the medium and long-term design of the water supply infrastructure with the protection of the entire municipality. Opposing extremes, such as prolonged drought and short-term flooding, do not cancel out but can even intensify each other's effects. This process requires

consideration at different scales, the combination of different types of expertise and cooperation between practice and science, as is done in projects such as EXDIMUM.

Within the EXDIMUM project, digital methods for capturing, modeling, and visualizing extreme weather events were tested in the Goslar catchment. By combining remote sensing data, wireless sensors, and adaptive hydrodynamic modeling, improved maps of land use change, soil moisture and tree mortality were produced, and the efficiency of runoff simulations was significantly increased. An interactive dashboard integrates sensors, remote sensing, and modeling data, supporting operational decision-making. The practical benefits of these approaches were demonstrated during the December 2023 flood, when the sensor network and data products aided in optimized emergency response planning. In the medium and long term, the methods and results help to plan retention facilities at optimal locations or prioritize reforestation at critical sites.

As climate change and its consequences will not only continue, but continue to increase, the corresponding difficulties will also rise in frequency and grow in scale. As the resources available for disaster prevention and mitigation cannot be increased at will, a particular challenge lies in the development of methods that not only allow the best possible simulations of expected processes, but also the identification of the most effective measures to positively influence the course of events. To this end, the EXDIMUM project is currently looking at approaches for stability analysis in order to identify critical constellations in which interventions of limited scope can have a major effect.

Hinweis zur Datenverfügbarkeit

Dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Daten, insbesondere relevante Output-Daten, werden über ein Github-Repository (FEKETE et al., 2025) zur Verfügung gestellt.

Danksagung

Die in diesem Artikel beschriebenen Arbeiten entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), inzwischen Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), geförderten Projektes EXDIMUM als Teil Fördermaßnahme „WaX – Wasser-Extremereignisse“. Die Fördermaßnahme WaX läuft unter dem Dach des Bundesprogramms „Wasser: N – Forschung und Innovation für Nachhaltigkeit“, das vom BMBF initiiert wurde. „Wasser: N“ ist Teil der Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA).

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Sándor P. Fekete
Dr. Phillip Keldenich
Michael Perk
Dr. Christian Rieck
Tobias Wallner
Abteilung Algorithmen
TU Braunschweig, 38106 Braunschweig
s.fekete@tu-bs.de

Dr. Pedro M. Achanccaray Diaz
Prof. Dr. Markus Gerke
Dr.-Ing. Björn Riedel
Fateme Saba
Aida Taghavi

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
TU Braunschweig, 38116 Braunschweig
m.gerke@tu-bs.de

Michael Figge
Anne Schröter
EURAWASSER Betriebsführungsgesellschaft mbH
Odermarkplatz 1, 38640 Goslar
michael.figge@eurawasser.de

Prof. Dr. Nicola Fohrer
Institut für Natur- und Ressourcenschutz,
Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel
nfohrer@hydrology.uni-kiel.de

Simon Giutronich
Tim Riedemann
Remondis Aqua Industrie GmbH & Co KG
Mengendamm 16, 30177 Hannover
simon.giutronich@remondis.de

Sebastian Lutz
Konstantin Schrader
AMENO GmbH
Steinriedendamm 15, 38108 Braunschweig
sebastian.lutz@ameno.de

Prof. Dr. Andreas Reinhardt
Daniel Szafranski
Institute of Computer Science
TU Clausthal, 38678 Clausthal-Zellerfeld
andreas.reinhardt@tu-clausthal.de

Christoph Richter
DSI Aerospace GmbH
Otto-Lilienthal-Str. 1, 28199 Bremen
christoph.richter@dsi-as.de

Prof. Dr. Paul D. Wagner
Institut für Geographische Wissenschaften,
Angewandte Physische Geographie,
Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement,
Freie Universität Berlin
Malteserstr. 74–100, 12249 Berlin
paul.wagner@fu-berlin.de

Literaturverzeichnis

- ARGE, L., A. LOWE, S.C. SVENDSEN & P.K. AGARWAL (2023): 1D and 2D Flow Routing on a Terrain. – ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems, 9(1), 3–39.
- ARNOLD, J.G., R. SRINIVASAN, R.S. MUTTIAH & J.R. WILLIAMS (1998): Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. – Journal of the American Water Resources Association, 34, 73–89.
- BABAEIAN, E., M. SADEGHI, S.B. JONES, C. MONTZKA, H. VERECKEN & M. TULLER (2019). Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. – Review of Geophysics, 57, 530–616.
- BIEGER, K., J.G. ARNOLD, H. RATHJENS, M.J. WHITE, D.D. BOSCH, P.M. ALLEN, M. VOLK & R. SRINIVASAN (2017): Introduction to SWAT+, a Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. – Journal of the American Water Resources Association, 53(1), 115–130.
- BLICKENDORFER, L., K. OEHMICHEN, D. PFLUGMACHER, B. KLEINSCHMIT & P. HOSTERT (2024): National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. – Remote Sensing of Environment, 304, 114069.
- BRADBROOK, K., S. WALLER & D. MORRIS (2005): National floodplain mapping: datasets and methods –160,000 km in 12 months. – Natural Hazards, 36, 103–123.
- DEUMLICH, D. & A. GERCKE (2020): Frequency trend analysis of heavy rainfall days for Germany. – Water, 12(7), 1950.
- FEKETE, S.P., P.M.A. DIAZ, M. FIGGE, N. FOHRER, M. GERKE, S. GIUTRONICH ... T. WALLNER (2025): Repository mit Forschungsdaten, <https://gitlab.ibr.cs.tu-bs.de/exdimum/wasserwirtschaft-im-zeichen-von-extremwetter>.
- FISCHER, E.M., S. SIPPEL & R. KNUTTI (2021): Increasing probability of record-shattering climate extremes. – Nature Climate Change, 11, 689–695.
- GAO, S., G. COLLECUTT, W.J. SYME & P. RYAN (2020): High resolution numerical modelling of tsunami inundation using quadtree method and GPU acceleration. Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress.
- HARDY, R.J., P.D. BATES & M.G. ANDERSON (1999): The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. – Journal of Hydrology, 216(1–2), 124–136.
- HUNTER, N.M., P.D. BATES, S. NEELZ, G. PENDER, I. VILLANUEVA ... D.C. MASON (2008): Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. Proceedings of the ICE – Water Management, 161(1), 13–30.
- IBEBUCHI, C.C. (2021): Patterns of atmospheric circulation in Western Europe linked to heavy rainfall in Germany: preliminary analysis into the 2021 heavy rainfall episode. – Theoretical and Applied Climatology, 148, 269–283.
- JIBHAKATE, S.M., P.V. TIMBADIYA & P.L. PATEL (2023): Flood hazard assessment for the coastal urban floodplain using 1D/2D coupled hydrodynamic model. – Natural Hazards, 116(2), 1557–1590.
- KNAPP, N., N. WELLBROCK, J. BIELEFELDT, P. DUHNELT, R. HENTSCHEL & A. BOLTE (2024): From single trees to country-wide maps: Modeling mortality rates in Germany based on the Crown Condition Survey. – Forest Ecology and Management, 568, 122081.
- KONG, X., S. GHAFAR, M. DETERMANN, K. FRIESE, S. JOMAA, C. MI, T. SHATWELL, K. RINKE & M. RODE (2022): Reservoir water quality deterioration due to deforestation emphasizes the indirect effects of global change. – Water Research, 221, 118721.
- LETTMODEN, R., P. ACHANCCARAY, K. BITTNER & M. GERKE (2025): Multi-GFM: Multi-temporal Framework for Multi-modal Geospatial Foundation Models. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Muttentz, Schweiz – Publikationen der DGPF, 33, 182–200.
- NAHA, S., M.A. RICO-RAMIREZ & R. ROSOLEM (2020): Quantifying the impact of land cover changes on hydrological extremes in India. – Hydrology and Earth System Sciences, 25(12), 6339–6357.
- LGLN, LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND LANDESVERMESSUNG NIEDERSACHSEN (2022): Auszug aus den Geodaten des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, <https://ni-lgln-opengeodata.hub.arcgis.com/pages/opengeodata>.
- LIU, C., C.M. ALBRECHT, Y. WANG & X. XIANG ZHU (2025): CromSS: Cross-Modal Pretraining With Noisy Labels for Remote Sensing Image Segmentation. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63, 1–17.

- PENG, J., C. ALBERGEL, A. BALENZANO, L. BROCCA, O. CARTUS, H. COSH, M.T. CROW & W.A. ROADMAP (2021): Roadmap for High-Resolution Satellite Soil Moisture Applications – Confronting Product Characteristics with User Requirements. – *Remote Sensing of Environment*, 252, 112162.
- PERK, M., P. KELDENICH, T. WALLNER & S.P. FEKETE (2025): Scalable algorithmic methods for computing hydrodynamic flows during heavy rain events. In Vorbereitung.
- SABA, F., P. DIAZ & M. GERKE (2025): Land use/Land cover mapping to monitor dead tree areas using multi-modal, multi-temporal Remote Sensing imagery and a deep learning model. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-6990.
- SCALGO (2025): Software-Dokumentation, <https://scalgo.com/en-US/scalgo-live-documentation/soil-vegetation-atmosphere-properties/soil>.
- SZAFRANSKI, D., M. BOUCHUR & A. REINHARDT (2022): Investigating Constructive Interference for LoRa-based WSNs. 19. GI/ITG KuVS Fachgespräch “Sensornetze” (FGSN), 25-28.
- SZAFRANSKI, D. & A. REINHARDT (2023a): ELORA: Even Longer Range Sensor Networking Through Modulated Concurrent LoRa Transmissions. 1st IEEE Workshop on Wireless outdoor, Long-Range and Low-Power Networks (WoLoLo), 388-393.
- SZAFRANSKI, D. & A. REINHARDT (2023b): Investigating the Effects of Precipitation on the Reliability of Lossy LoRaWAN Links. 20. GI/ITG KuVS Fachgespräch “Sensornetze” (FGSN), 19-21.
- SZAFRANSKI, D. (2024): Predictability of LoRaWAN Link Quality based on Weather Data: Insights from a Long-Term Study. 25th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 249-258.
- WAGNER, P.D., S.M. BHALLAMUDI, B. NARASIMHAN, S. KUMAR, N. FOHRER & P. FIENER (2019): Comparing the effects of dynamic versus static representations of land use change in hydrologic impact assessments. – *Environmental Modelling & Software*, 122, 103987.
- WAGNER, P.D., F. SABA, P. ACHANCCARAY & N. FOHRER (2025): Drought-induced land use and land cover change impacts on hydrology: Insights from the Harz mountains, Germany. – *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3091>.
- WAGNER, P.D., K. BIEGER, J. ARNOLD & N. FOHRER (2022): Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+. – *Hydrological Processes*, 36(5), e14589.
- ZANAGA, D., R. VAN DE KERCHOVE, D. DAEMS, W. DE KEERSMAECKER, C. BROCKMANN ... O. ARINO (2022): ESA WorldCover 10 m 2021, v200.
- ZANAGA, D., R. VAN DE KERCHOVE, W. DE KEERSMAECKER, N. SOUVERIJNS, C. BROCKMANN ... O. ARINO (2021): ESA WorldCover 10 m 2020, v100.