

Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden: Das EXDIMUM-Projekt

**MARKUS GERKE¹, PEDRO ACHANCCARAY DIAZ¹, SÁNDOR P. FEKETE²,
MICHAEL FIGGE³, NICOLA FOHRER⁴, SIMON GIUTRONICH⁵, PHILLIP KELDENICH²,
SEBASTIAN LUTZ⁶, MICHAEL PERK², ANDREAS REINHARDT⁷, CHRISTOPH RICHTER⁸,
CHRISTIAN RIECK², BJÖRN RIEDEL¹, TIM RIEDEMANN⁵, FATEMEH SABA¹,
KONSTANTIN SCHRADER⁶, ANNE SCHRÖTER³, DANIEL SZAFRANSKI⁷,
AIDA TAGHAVI¹ & PAUL WAGNER⁴**

Zusammenfassung: Der globale Wandel stellt mit den einhergehenden außergewöhnlichen Wetterereignissen hohe Anforderungen an das Wassermanagement. In diesem Beitrag stellen wir das Forschungsprojekt EXDIMUM vor, das sich mit Fragestellungen zum Management der Auswirkungen von Extremwetter im Oberharz, insbesondere hinsichtlich Starkregen befasst. Im Projekt wird ein meso-skalisches hydrologisches Einzugsgebietsmodell entwickelt, das den Wasserhaushalt abbildet. Mit dessen Hilfe werden Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimawandel auf die Hydrologie untersucht. Weiterhin wird ein dynamisches, hochaufgelöstes Abflussmodell dazu dienen, Wasserschutzmaßnahmen besser zu planen. Die Modellierung wird durch ein Sensornetzwerk ergänzt, das Veränderungen hydrologischer Größen in Echtzeit erfasst. Der Fernerkundung kommt im Projekt eine wichtige Rolle u. a. bei der Erfassung der Landnutzungsänderungen und insbesondere des Baumsterbens in Folge von Dürreperioden zu. Erste Ergebnisse des noch laufenden Projektes zeigen, dass die Modelle gut die tatsächlichen Verhältnisse abbilden. Einzelne Komponenten konnten bereits beim jüngsten Hochwasser wertvolle Informationen liefern.

1 Einleitung

Der globale Wandel hat bereits heute deutliche Auswirkungen auf die Hydrologie. Insbesondere verschieben sich in jüngster Zeit nicht nur die Durchschnittswerte der Niederschlagsmengen, sondern auch die Extreme besonderer Trockenheit und kurzfristige Starkregenereignisse nehmen zu. Diese Entwicklung führt zu Herausforderungen, die sich auf verschiedenen Skalen

¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bienroder Weg 81, D-38106 Braunschweig, E-Mail: [m.gerke, fatemeh.saba, p.diaz, b.riedel, a.taghavi]@tu-braunschweig.de

² Technische Universität Braunschweig, Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund, Abt. Algorithmik, Mühlentpfadstr. 23, D-38106 Braunschweig, E-Mail: s.fekete@tu-braunschweig.de, [keldenich, perk, rieck]@ibr.cs.tu-bs.de

³ EURAWASSER Betriebsführungsgesellschaft mbH, Odermarkplatz 1, D-38640 Goslar, E-mail: [michael.figge, anne.schroeter]@eurawasser.de

⁴ Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Natur- und Ressourcenschutz, Hydrologie und Wasserwirtschaft, Olshausenstr. 75, D-24118 Kiel, E-Mail: [pwagner, nfohrer]@hydrology.uni-kiel.de

⁵ REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG, Brunnenstr. 138, D-44536 Lünen, E-Mail: [tim.riedemann, simon.giutronich]@remondis.de

⁶ AMENO GmbH, Fritz-König-Straße 65, D-38667 Bad Harzburg, E-Mail: [sebastian.lutz, konstantin.schrader]@ameno.de

⁷ Technische Universität Clausthal, Institut für Informatik, Julius-Albert-Str. 4, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: [andreas.reinhardt, daniel.szafranski]@tu-clausthal.de

⁸ DSI Aerospace GmbH, Otto-Lilienthal-Str. 1, D-28199 Bremen, E-Mail: christoph.richter@dsi-as.de

abspielen: es müssen räumlich lokale wie großräumige Veränderungen und Parameter betrachtet werden; in der zeitlichen Dimension ist sowohl die Berücksichtigung kurzfristiger Änderungen, wie sichtbar an aktuellen Pegelständen, aber auch langfristige Änderungen der Landbedeckung zu bedenken. Weiterhin sollte das Gelände, vor allem in Gebirgen, auf verschiedenen Skalen berücksichtigt werden, um die Auswirkungen auf vorhandene Retentionsanlagen zu modellieren, bzw. auch um ggf. bauliche Maßnahmen zu ergreifen.

In diesem Beitrag berichten wir über das BMBF-geförderte Projekt EXDIMUM (<https://www.exdimum.org/>) (Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden), das sich beispielhaft in der Region Harz mit Fragestellungen zum Extremwetter beschäftigt. Hierbei sind viele der hier gezeigten Ergebnisse als Zwischenresultate zu verstehen, da EXDIMUM noch bis Ende Januar 2025 gefördert wird.

Im Rahmen des Projektes kommen zwei komplementäre Betrachtungsweisen zum Einsatz. Zum einen wird die räumliche Verteilung von Wasser aufgrund der geometrischen Struktur des Geländes modelliert (ARGE et al. 2023). Prinzipiell nutzt man dabei die dreidimensionale Geometrie auf Basis hochaufgelöster Geländedaten (etwa DGM1) und berechnet dann Fließwege und Abfluss sowie den daraus letztlich resultierenden Füllstand in Senken, bzw. in Retentionsanlagen. Eine besondere Herausforderung, die von uns im Rahmen des Projekts untersucht wird ist darüber hinaus die zeitliche Dynamik des Oberflächenabflusses.

Zum anderen wird für die Modellierung des Wasserhaushalts das Modell SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool, ARNOLD et al. 1998; BIEGER et al. 2017) genutzt. Das hydrologische Modell zeichnet sich unter anderem durch seine vielseitige Anwendbarkeit in unterschiedlichen Einzugsgebieten aus. Insbesondere ist es für die Untersuchung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hydrologie geeignet. In EXDIMUM wird SWAT+ deshalb genutzt, um Auswirkungen von Dürreperioden und Baumsterben im Harz auf die Hydrologie zu untersuchen. Dabei greift das Modell auf fernerkundungsbasierte Klassifikationen der Landnutzung und des Baumsterbens zurück. Ziel der Modellierung mit SWAT+ ist zunächst eine möglichst genaue Abbildung von Extremereignissen als Grundlage für die Untersuchung der Auswirkungen dieser Ereignisse in der Vergangenheit. Aus den Extremereignissen der Vergangenheit und ihren raum-zeitlichen Ausprägungen sollen Rückschlüsse für künftige Extremereignisse gezogen werden.

Für die Landnutzungs- und -bedeckungsklassifizierung (LULC) aus Fernerkundungsdaten werden in dem Projekt Ansätze, die auf Deep-Learning-Algorithmen (DL) beruhen, angewendet. Mehrere Studien zeigen, dass DL dem traditionellen maschinellen Lernen bei der Klassifizierung von LULC in Fernerkundungsdaten überlegen ist (SONG et al. 2019; ALEM & KUMAR 2020; VALI et al. 2020). Ein Ziel der Arbeit im Rahmen des Projektes ist es daher, das Potenzial von DL-Modellen in Verbindung mit optischen Sentinel-2-Daten in Kombination mit Sentinel-1-Radardaten, sowie Rapideye-Daten zu nutzen, um präzise LULC-Karten für den Zeitraum 2010-2023 zu erstellen, die Eingang in die SWAT+ - Modellierung finden werden. In diesem Beitrag berichten wir über die Ergebnisse für den Zeitraum 2019 bis 2023.

Die Modellierung von Abflüssen auf verschiedenen Skalen soll längerfristig helfen, das hydrologische System in der Zielregion besser zu verstehen. Ein wichtiger Bestandteil im Monitoring stellt die Erfassung hydrologischer Größen dar, die bei der Einschätzung einer aktuellen Lage helfen. Aus diesem Grund wurden im Zielgebiet Sensoren ausgebracht, die kontinuierlich Pegelstände, Bodenfeuchte, Niederschlagsmengen, Temperatur und Luftfeuchte messen und in einem zentralen Datenportal (“Dashboard”) zusammengeführt werden. Im Projekt entwickelte

Kommunikationsprotokolle machen hierbei selbst dann eine Übertragung von Messwerten noch möglich, wenn die Funkkommunikation durch Extremwetter negativ beeinflusst wird.

Das Zusammenspiel der multiskaligen hydrologischen Modellierung und Sensordatenerfassung ermöglichen es, bei auftretenden Extremereignissen zielführende Prognosen und Handlungsempfehlungen für Netzbetreiber und Flussgebietsmanager abzuleiten. Wetterereignisse werden so in Echtzeit dynamisch für Anwender sichtbar, wodurch das Personal zu ihrem Management effizient eingesetzt werden kann. Darüber hinaus können durch die Simulation möglicher Extremwetterlagen bereits im Vorfeld (z.B. bei vorhergesagten großen Niederschlagsmengen) aussichtsreiche Handlungsansätze identifiziert und verifiziert werden. Präventive Arbeiten, wie das Verstärken von Dämmen, werden auf diese Weise zugänglich. Der so erzielbare gesteigerte Schutz vor Hochwasser – auch in klima-, trockenheits- und bodenbedingter veränderter Gesamtkonstellation – dient gleichermaßen dem Schutz der Gesellschaft und der Reduktion von Beeinträchtigungen der regionalen Wirtschaft, indem verheerende Auswirkungen zumindest abgeschwächt werden.

Ein weiterer Untersuchungsaspekt ist jener der Schwermetallbelastung der Gewässer im Harz. Eine erhöhte Belastung der Gewässer aufgrund der Bergbauhistorie in der Region ist bekannt. In EXDIMUM wird diese im Untersuchungsgebiet räumlich verteilt untersucht. Außerdem soll die potentielle Wirkung von Extremereignissen auf den Austrag von Schwermetallen aus der ehemaligen Bergbauregion anhand von Messungen und Modellergebnissen für den Sedimentaustrag abgeschätzt werden.

Im nächsten Kapitel beschreiben wir zunächst die zugrunde liegenden Datenquellen und die initiale Auswertung der originären Beobachtungen. Diese gehen sowohl in die hochaufgelöste, dynamische Abflussmodellierung als auch in die großräumige Modellierung von hydrologischen Extremen ein. Diese beiden Verfahren werden in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 beschreibt die Visualisierung im Dashboard und in Kapitel 5 zeigen wir Ergebnisse der verschiedenen Komponenten, während abschließend ein Fazit und ein Ausblick folgt.

2 Datenquellen und -auswertung

Sensordaten werden in EXDIMUM verschiedentlich genutzt. Satellitengestützte Fernerkundungsdaten dienen zur Ableitung von Landnutzung und -bedeckungskarten von 2010 bis heute, und in der Untersuchungsregion ausgebrachte terrestrische Sensorik erfasst Zustandsgrößen in situ.

2.1 Fernerkundungsdaten für die LULC-Klassifikation

Wir konzentrieren uns auf verschiedene Bodenbedeckungsarten wie Ackerland, Grünland, bebaute Gebiete und Gewässer. Außerdem werden Baumarten in Nadel- und Laubbäume unterschieden, sowie der Vegetationszustand, insbesondere abgestorbene Bäume, berücksichtigt. Da aktuelle LULC-Karten mit den gewünschten sieben Klassen nicht verfügbar sind, haben wir verschiedene Datenquellen integriert, um eine Referenzklassifizierung zu erstellen: Im Zusammenhang mit den LULC-Typen haben wir die für diese Anwendung verfügbare ESA-Karte als Referenz verwendet. Die Europäische Weltraumorganisation stellt mit WorldCover zwei globale Karten für 2020/2021 zur Verfügung. Die Produkte mit 11 Landbedeckungsklassen und einer räumlichen Auflösung von 10 m wurden mit einem Random Forest-Klassifikator und Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten erstellt und erreichten eine Gesamtgenauigkeit von 75% für 2020 (ZANAGA et al. 2021) und 77 % für 2021 (ZANAGA et al. 2022). Unter der Annahme, dass

die Baumarten über die Jahre hinweg konstant bleiben, haben wir diese Karte als Referenz für die Jahre 2020/2021 verwendet. Für die abgestorbenen Bäume haben wir visuell aus hochauflösenden Bildern Referenzen erzeugt.

Um die genannten Klassen für verschiedene Jahre abzuleiten, wurden Satellitendaten verwendet, wobei die Referenzdaten der jeweiligen Jahre zum Trainieren eines U-Net-basierten CNN verwendet werden (RONNEBERGER et al. 2015). In dieser kurzen Zusammenfassung berichten wir über die Schätzung der sieben Klassen auf der Grundlage von Sentinel-1 und Sentinel-2. Die Sentinel-2-Oberflächenreflexionsbilder mit 13 Spektralbändern und verschiedenen räumlichen Auflösungen (10, 20 und 60 m) und einer Wolkenbedeckung von weniger als 5% wurden für die Vegetationsperiode (Mai-August) pro Jahr von 2019 bis 2023 erfasst. Darüber hinaus haben wir dualpolarisierte C-Band Sentinel-1-Radarbilder mit einer räumlichen Auflösung von 10 m und einer zeitlichen Auflösung von 6-12 Tagen verwendet. Die SAR-Bilder wurden im interferometrischen Wide-Swath-Modus mit zwei Polarisations schemata, d. h. VV und VH, erfasst und für die Vegetationsperiode von 2019 bis 2023 aufgenommen. Für jede Sentinel-1-Szene wurden mehrere Vorverarbeitungsschritte wie die Entfernung des thermischen Rauschens, die radiometrische Kalibrierung und die Geländekorrekturen durchgeführt, und auf jedes SAR-Bild wurde ein Medianfilter mit einer Fenstergröße von 3×3 Pixeln angewendet, um den Speckle-Effekt zu reduzieren.

Um die Daten aus optischen und Radardaten zu verknüpfen, normalisierten wir die Bildwerte auf den Bereich von 0 bis 1. Dieser Normalisierungsschritt wird üblicherweise durchgeführt, um die Konvergenz von Deep-Learning-Modellen zu verbessern.

Wir verwendeten die zehn Spektralbänder und drei Vegetationsindizes (NDVI, GNDVI, NDVI_rededge), die aus optischen Sentinel-2-Bildern generiert wurden, sowie zwei Polarisierungen (VV und VH), die aus Sentinel-1-Bildern abgeleitet wurden, als Eingabedaten für das Training des U-Net-Modells. Die Eingabedaten wurden zu $(256 \times 256 \times 15)$ Datenwürfel vorverarbeitet, wobei sich 256×256 auf die Breite und Höhe des Bildfeldes und 15 auf die Anzahl der Merkmale (d. h. Kanäle, Vegetationsindizes und Polarisierungen) beziehen.

Der ursprüngliche Datensatz wurde nach dem Zufallsprinzip in einen Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz im Verhältnis 70:10:20 aufgeteilt. Um die Trainings- und Validierungszeit zu minimieren, wurden 64, 128 und 256 Filter mit einer Größe von 3×3 für die Faltungsschichten gewählt. Außerdem wurde nach jeder Faltungsschicht eine Batch-Normalisierung durchgeführt. Anschließend wurde eine Max-Pooling-Schicht eingesetzt, um die Operation auf 2×2 räumliche Matrizen zu beschränken. Außerdem wurde eine Dropout-Schicht mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 verwendet, um die Neuronen bei jedem Trainingsschritt zufällig zu deaktivieren. Die Ausgabe des Modells ist ein 7-dimensionales Feld, das jedem Pixel die Wahrscheinlichkeit zuweist, zu einer der Zielklassen zu gehören. Während des Trainingsprozesses wurden Techniken zur Datenerweiterung (Augmentation), wie Rotations- und Flip-Operationen, nach dem Zufallsprinzip angewendet. Um das Endergebnis für die Vorhersage der jährlichen LULC-Karten von 2019 bis 2023 zu erhalten, wurde jeweils die wahrscheinlichste Klasse pro Pixel gewählt.

2.2 Bodensensorik

Zur Erfassung hydrologisch bedeutender Variablen mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung kommt ein drahtloses terrestrisches Sensornetzwerk zum Einsatz. Das auf LoRa-WAN basierende System lässt sich einfach um neue Sensoren erweitern.

2.2.1 Terrestrisches Sensornetzwerk

Mit Unterstützung der Konsortialpartner, externer Experten, lokaler Akteure und assoziierter Partner hat die REMONDIS Aqua Industrie (RAI) ein umfassendes terrestrisches Sensornetzwerk im Projekteinzugsgebiet im Harz konzipiert, untersucht und installiert. Das Sensornetz nutzt Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) zur drahtlosen Messdatenübertragung und besteht aus 14 Pegelsensoren, acht Niederschlagssensoren, vier Bodenfeuchtesensoren sowie einer Wetterstation, welche an wichtigen Punkten in der Projektregion installiert sind.

Basierend auf den ausgewählten Sensorstandorten und den Einschränkungen der lokalen Behörden wird von der RAI eine geeignete Montagevorrichtung verwendet, um beispielsweise Wehre nicht zu beschädigen. Die Sensoren sind nach den vorherrschenden Umweltbedingungen an den jeweiligen Standorten kalibriert und die Plausibilität der erfassten Sensordaten wird vor Ort bestätigt. Die Messung der hydrologischen Variablen erfolgt periodisch, sodass eine hohe zeitliche Auflösung erreicht wird und stets auf aktuelle Messdaten zurückgegriffen werden kann. Durch die Speicherung der Daten entsteht ein hochaufgelöster historischer Datensatz, welcher für Analysen a posteriori genutzt wird.

Durch die Installation und Optimierung der Standorte mehrerer Gateways erreicht das Sensornetz aktuell eine LoRaWAN-Abdeckung von über 90% der Region Goslar. Die Signalstärke der Sensoren wird dabei stetig überwacht. Während des Projekts werden weitere Anpassungen an Sensoren und Gateways vorgenommen, um die drahtlose Datenübertragung zu optimieren und zu verbessern, insbesondere im Hinblick auf wechselnde Umweltbedingungen.

2.2.2 Entwicklung eines Ultra Low Power (ULP) Kamera Systems mit Field Programmable Gate Array (FPGA) basierter KI Verarbeitung

Um dem Gesamtsystem darüber hinaus weitere Datenquellen zur Verfügung zu stellen, wird ein zuverlässiges und energiesparendes Kamerasystem entwickelt. Dafür wurde eine energieeffiziente Hardware-Platine erstellt. Die Platine umfasst den Lattice Semiconductor Crosslink NX ULP FPGA (Lattice Semiconductor 2023), der mit 39.000 Lookup-Tables (LUT) und 32 MB Zwischenspeicher für die Implementierung eines, oder bei Bedarf mehrerer einfacher KI Algorithmen, wie z.B. Auswertung von Flusspegeln, Schneehöhe oder Gesundheitsmonitoring von Bäumen ausgestattet ist. Hierbei sollen kritische Stellen in der Natur mit einem für Extremwetter beständigen und flexibel montierbaren System in regelmäßigen Zeitabständen beobachtet und durch einen KI-Algorithmus ausgewertet werden. Das Ergebnis wird, analog zu den konventionellen Sensortypen, über LoRaWAN übertragen. Für mögliche verschiedene Auswertungen können mehrere neuronale Netze, die bei Bedarf hintereinander die Bilddaten auswerten können, oder weitere Sensorik in das System implementiert werden.

2.2.3 Zuverlässige Sensorkommunikation unter Extremwetterbedingungen

Die Zuverlässigkeit der drahtlosen Übertragung der Messwerte ist in zweierlei Hinsicht von großer Bedeutung. Zum einen, um im Fall eines hydrologischen Extremereignisses aktuelle Messdaten, insbesondere an kritischen Messpunkten, für eventuelle Sofortmaßnahmen zur Verfügung zu haben. Andererseits, um einen möglichst lückenlosen historischen Datensatz aufzubauen, welcher für spätere Analysen genutzt werden kann. Die Abschwächung drahtloser Signale durch Hindernisse in der Fresnelzone zwischen Sender und Empfänger (bspw. Niederschlag oder veränderte Vegetation) kann jedoch zum Verbindungsverlust führen, wodurch wichtige Messpunkte verloren gehen können. Sowohl verwandte Arbeiten als auch unsere Un-

tersuchungen in der Pilotregion zeigen, dass verschiedene Wetterparameter, wie die Temperatur (CATTANI et al. 2017) oder Niederschlag (ANASTASI et al. 2004) die Zuverlässigkeit der Datenübertragung stark beeinträchtigen können. Daher verfolgen wir das Ziel, die Zuverlässigkeit unter extremen Wetterbedingungen zu erhöhen. Dazu haben wir das Konzept der konstruktiven Interferenz untersucht. Dabei kommt es durch die Überlagerung der elektromagnetischen Wellen mehrerer Sender zu einer Erhöhung der Signalstärke und damit einhergehend größeren Resilienz gegenüber Störeinflüssen, wie extremem Wetter. Unsere weiteren Untersuchungen dazu (SZAFRANSKI et al. 2022) zeigten, dass dabei sehr hohe Anforderungen an die Zeit-Synchronität zwischen den Sendern existieren, welche in der Praxis nicht dauerhaft realisierbar sind. Um von diesem Konzept dennoch profitieren zu können, haben wir mit ELORA ein alternatives Modulationsschema, basierend auf On-Off Keying (OOK) und Pulse-Width Modulation (PWM), vorgestellt, welches auch bei nicht idealer Zeit-Synchronität die Vorteile der konstruktiven Interferenz nutzen kann (SZAFRANSKI & REINHARDT 2023).

2.2.4 Sensordaten-Aufbereitung

Daten werden aus verschiedenen internen und externen Quellen gesammelt und zunächst nicht verifiziert und unkomprimiert gespeichert. Um Grundlage für nachfolgende Modelle zu sein, müssen die Rohdaten validiert, korrigiert und optimiert werden. Bedingt durch Messungenauigkeiten, Übertragungsprobleme und externe Faktoren hat sich gezeigt, dass die gemessenen Datenreihen beinahe ausnahmslos lücken- und fehlerhaft sind.

Zur Verifikation werden mehrere Methoden eingesetzt. Zunächst werden die Werte auf ihre natürlichen physikalischen Grenzen geprüft. Anschließend findet eine Prüfung auf Sensorgrenzwerte statt. Im dritten Schritt wird ein Modell trainiert, das sowohl innerhalb einer Datenreihe als auch durch Korrelationsanalyse die gemessenen Werte auf Plausibilität prüft. In diesem Projekt werden darüber hinaus verschiedene weitere Plausibilitätskontrollen genutzt. Aus den jeweiligen Bewertungen wird abschließend ein Mittelwert gebildet, welcher eine Bewertung der Plausibilität eines neuen Messwertes zulässt.

Die Rohdaten liegen unabhängig vom Sensortyp als String (Zeichenkette) vor. Zur Reduzierung des Speicherbedarfs werden für unterschiedliche Messreihen verschiedene Kompressionsverfahren in Betracht gezogen. Bei Datenreihen wie Niederschlag, Blitzzähler, Blitzdistanz und Sonnenstrahlung der Wetterstation fallen längere Perioden von 0-Werten auf. Hier werden anstelle der Einzelwerte lediglich die Start- und Endzeiten dieser Perioden gespeichert. Wenn möglich, werden Messwertkurve durch Splines ersetzt. Hier muss der Verlust an Genauigkeit unterhalb der Messgenauigkeit des Sensors bleiben. Des Weiteren werden herkömmliche Kompressionsverfahren wie run-length-encoding, Huffmanbaum, diskrete Kosinus Transformation (JPEG) und die Lempel-Ziv-Kompression (Zip) auf ihre Nutzbarkeit in Bezug auf Zeitreihendaten untersucht. Dabei werden die Faktoren Speicherbedarf, Rechenaufwand und Datenverlust der einzelnen Methoden verglichen.

2.2.5 Ermittlung der Schwermetallbelastung

Zwei Beprobungen zur räumlich differenzierten Erfassung der Schwermetallbelastung wurden im August 2022 und 2023 in den Gewässern im Harz durchgeführt und die Proben anschließend im Umweltlabor der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel untersucht und ausgewertet. Dazu wurden vor jeder Einmündung Sedimentproben aus dem Gewässerbett des Haupt- und

Zuflusses an 42 Stellen im Untersuchungsgebiet genommen. Die Untersuchung soll in Kombination mit dem in SWAT+ modellierten Sedimentaustrag Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Extremereignissen auf die Schwermetallbelastung erlauben.

3 Modellierung

Wir betrachten für die Modellierung der Wasserverteilung zum einen die hochauflösende, dynamische Abflussmodellierung aufgrund der Geländegeometrie (3.1), zum anderen den Landschaftswasserhaushalt auf Basis eines hydrologischen Modells (3.2).

3.1 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 ist allerdings sehr rechenintensiv: die Durchführung einer hydrodynamischen Analyse eines großen Gebietes in hoher Auflösung kann Wochen oder sogar Monate dauern (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. Darüber hinaus unterstützen manche hydrodynamische Analyseprogramme die Darstellung des Geländes mit ungleichmäßiger Auflösung. So nutzt beispielsweise die kommerzielle Software TUFLOW eine Quadtree-Datenstruktur, um Zellen in unterschiedlicher Auflösung zu simulieren (GAO et al. 2020).

Neben diesen reinen Höhendaten werden in EXDIMUM als Eingabe für das hydrodynamische Modell auch Landnutzungs- und Bodenfeuchtedaten, sowie Sensordaten zur Wetterlage und Pegelständen verwendet, die durch die anderen Partner gemessen und berechnet werden. Weitere Informationen wie Gebäudeumrisse, Straßen und Brücken werden aus öffentlich zugänglichen Datenquellen wie Open Street Map oder amtlichen Daten extrahiert. Zudem wird die Interaktion zwischen dem hydrodynamischen Modell und dem Geländemodell betrachtet. Allerdings sind derartige Untersuchungen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs extrem rechenintensiv, so dass großskalige Szenarien nicht ohne Weiteres behandelt werden können. Daher ist es wünschenswert, durch die Vereinfachung komplexer Geometrien genug Zeit bei der hydrodynamischen Simulation einzusparen, sodass praxisrelevante Szenarien untersucht werden können. Bekannte Algorithmen aus dem Bereich der Terrain Simplification können verwendet werden, um jene Teile des Höhenmodells zu identifizieren, die mit einer geringeren oder höheren Auflösung simuliert werden können bzw. sollten. Diese Algorithmen können in einigen Fällen garantieren, dass das vereinfachte Terrain sich nur in einem gewissen Grad (innerhalb einer Fehlertoleranz) vom Ursprungsmodell unterscheidet. Eine solche Vereinfachung kann sowohl rasterbasiert als auch auf einer TIN-Datenstruktur erfolgen. Nachdem das vereinfachte Höhenmodell berechnet wurde, entscheidet der Grad der Änderung in einer bestimmten

Region darüber, in welcher Auflösung der Bereich in einem hydrodynamischen Modell simuliert wird.

Anstatt der Vereinfachung der Geometrien liefert eine Klassifizierung des Geländes außerdem mittels sogenannter Geomorphons Aufschluss über (hydrodynamisch) interessante und weniger interessante Geländeabschnitte (JASIEWICZ & STEPINSKI 2013). Auf Basis dieser Informationen können dann unterschiedliche Auflösungen für die verschiedenen Gebiete berechnet werden.

3.2 Hydrologische Modellierung mit SWAT+

SWAT+ ist die neueste Version des etablierten 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. Zur Erstellung der Hydrotopen werden ein Höhenmodell, eine Bodenkarte und eine Landnutzungskarte benötigt. Überdies werden Wetterdaten als Eingangsdaten und Abflussdaten zur Modellkalibrierung und -validierung genutzt.

Das SWAT+Modell im Projekt EXDIMUM wird für das Einzugsgebiet der Oker am Pegel Schladen und die Fokuseinzugsgebiete von Gose und Abzucht oberhalb der Stadt Goslar erstellt. Als räumliche Eingangsdaten werden das auf 5 m skalierte DEM1, die Bodenübersichtskarte 1:200 000 (BÜK 200) und eine Landnutzungskarte aus der Fernerkundung (s.o.) verwendet. Hieraus ergeben sich 2563 Hydrotopen. Es werden weiterhin Wetterdaten von acht Wetterstationen des DWD und der Harzwasserwerke verwendet. Die Qualität der Niederschlagsdaten wurde mit Doppelsummenanalysen überprüft und Fehlwerte mit Hilfe eines Regressionsansatzes und den zwei am besten korrelierten Stationen gefüllt. Um die räumliche Variabilität des Niederschlags besser abzubilden, wurde eine räumliche Interpolation mit der Höhe als Kovariablen durchgeführt (WAGNER et al. 2012). Kalibrierung und Validierung des Modells erfolgte zunächst für den Pegel Sennhütte an der Gose im Fokuseinzugsgebiet. Insbesondere wird SWAT+ für extrem feuchte und trockene Bedingungen kalibriert. Hierbei wird die Modellgüte für hohe und niedrige Abflüsse anhand der entsprechenden Abschnitte der Abflussdauerlinie bewertet und für die Kalibrierung genutzt.

4 Visualisierung

Zur Erhebung praxisrelevanter Anforderungen und Spezifikation des Gesamtsystems wurde ein „Runder Tisch“ organisiert, bei dem auch projektexterne Teilnehmer aus dem Kreis Goslar identifiziert und zusammengebracht wurden. Ziel des Runden Tisches ist es, ein Netzwerk zwischen den einzelnen Projektteilnehmern sowie notwendigen Institutionen wie Feuerwehr, Unterhaltungsverbänden, Forstämtern und Grundeigentümern aufzubauen. Unter anderem wurde eine Umfrage durchgeführt, um Feedback zur Darstellung der Daten zu sammeln. Die Ergebnisse dieser Umfrage werden verwendet, um iterative Anpassungen an der Programmierung des Dashboards vorzunehmen und eine praxisrelevante Visualisierung zu generieren.

4.1 Dashboard

Als grafische Oberfläche dient als Grundelement eine Karte der Projektregion, in welcher 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 Polygongröße ist definiert durch die angestrebte Auflösung. Die Formen der Polygone beruhen auf der Topologie und den geografischen Gegebenheiten. Sie werden mittels eines Algorithmus anhand der Karteninformation erstellt. Die aus dem Projekt gewonnen Informationen und Messdaten aus Fernerkundung, terrestrische Sensoren und Modelldaten werden in das GeoJSON-Format überführt und anhand ihrer Koordinaten einem Polygon zugeordnet, verarbeitet und in die vorgesehenen Ebenen eingefügt.

Die Karte ist vektorbasiert und erlaubt eine hohe Auflösung auch bei der Benutzung der Zoomfunktion. Die Karte stellt Informationen zu den Polygonen mit einem Klick bereit. Die Informationen werden zusätzlich in einem Popup-Fenster angezeigt. Die Layer sind unabhängig voneinander. Es ist zudem möglich, die Layer anwenderspezifisch zu deaktivieren, um nur die jeweils relevante Information anzuzeigen und den Zugriff auf bestimmte Datenarten auf einen Nutzerkreis zu beschränken. Mit dem modularen Aufbau sind die Datenströme unabhängig. Die Datenübertragung ist mittels APIs bzw. REST APIs umgesetzt und Daten laufen auf dem Server der AMENO GmbH zusammen. Hier werden die Rohdaten in Quasi-Echtzeit validiert, korrigiert und für die Anzeige bereitgestellt. In Abb. 1 sind exemplarisch einige Sensordaten aufgeführt, die die Situation im Projektgebiet zur Zeit der Aufnahme darstellt.

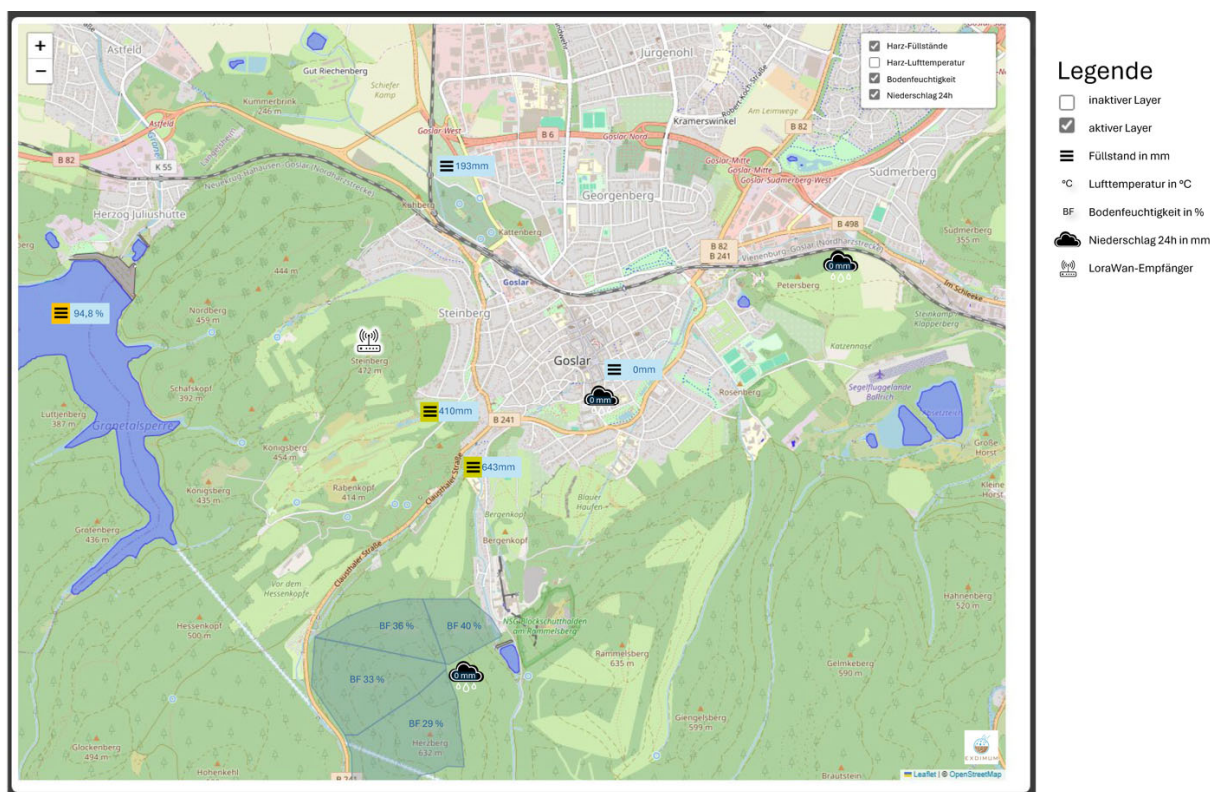


Abb. 1: Exemplarische Darstellung der Daten im Dashboard

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel gehen wir auf vorläufige Ergebnisse der LULC-Klassifizierung und der Modellierung auf den beiden Skalen ein. Ferner berichten wir von der Nutzung des Sensornetzwerkes beim Hochwasser Ende Dezember 2023 und von der Schwermetalluntersuchung.

5.1 LULC-Klassifizierung

Die vorläufigen Ergebnisse der LULC-Klassifizierung innerhalb des Untersuchungsgebiets für die Jahre 2019 bis 2023 zeigten keine signifikanten Veränderungen in allen Klassen, mit Ausnahme der Flächen mit toten Bäumen. Bei der visuellen Analyse der Flächen mit toten Bäumen wurde von 2019 bis 2023 ein klarer Trend zur Zunahme festgestellt. Insbesondere ging eine Zunahme der Flächen mit abgestorbenen Bäumen mit einer Abnahme der Klasse der Nadelbäume einher, was auf eine bemerkenswerte Verschiebung in der Landschaftszusammensetzung hinweist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich sowohl das erstmalige Auftreten als auch die meisten Veränderungen der Totholzflächen über die Jahre hinweg überwiegend im Oberharz konzentrieren (Abb. 2), aber auch im Fokuseinzugsgebiet konnte diese Veränderung nachgewiesen werden. Die Gesamtgenauigkeit der LULC-Klassifikation über alle Klassen hinweg beläuft sich auf 88%.

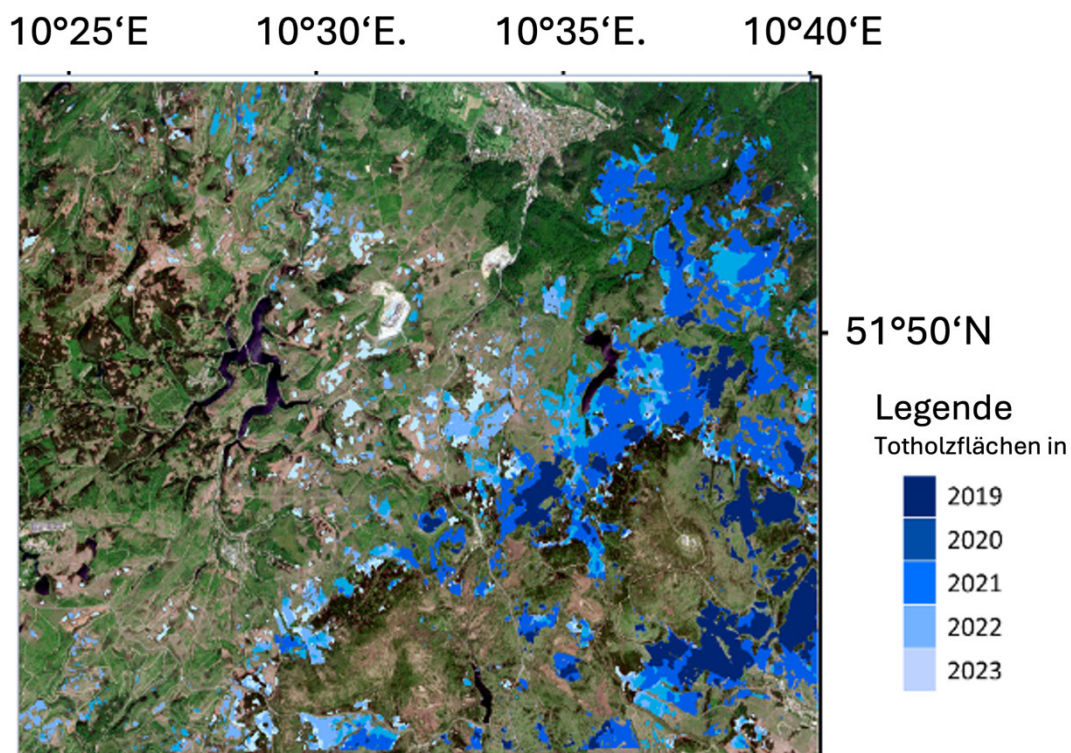


Abb. 2: Entwicklung der Klasse "Totholz" über die Jahre 2019 bis 2023

5.2 Hochauflösende dynamische Abflussmodellierung

Auch in der Berechnung des dynamischen Abflusses konnten bereits Ergebnisse erzielt werden. Durch die Verknüpfung von Geländedaten, Sensordaten, Landnutzungsdaten und Gebäudedaten können wir bereits historische Ereignisse simulieren; siehe Abb. 3. Um genaue Vorhersagen zu aktuellen Extremwetterlagen in Zukunft in skalierbarer Weise gewährleisten zu

können, haben wir die Laufzeitoptimierung der zugrundeliegenden Modelle untersucht. Ziel ist 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.

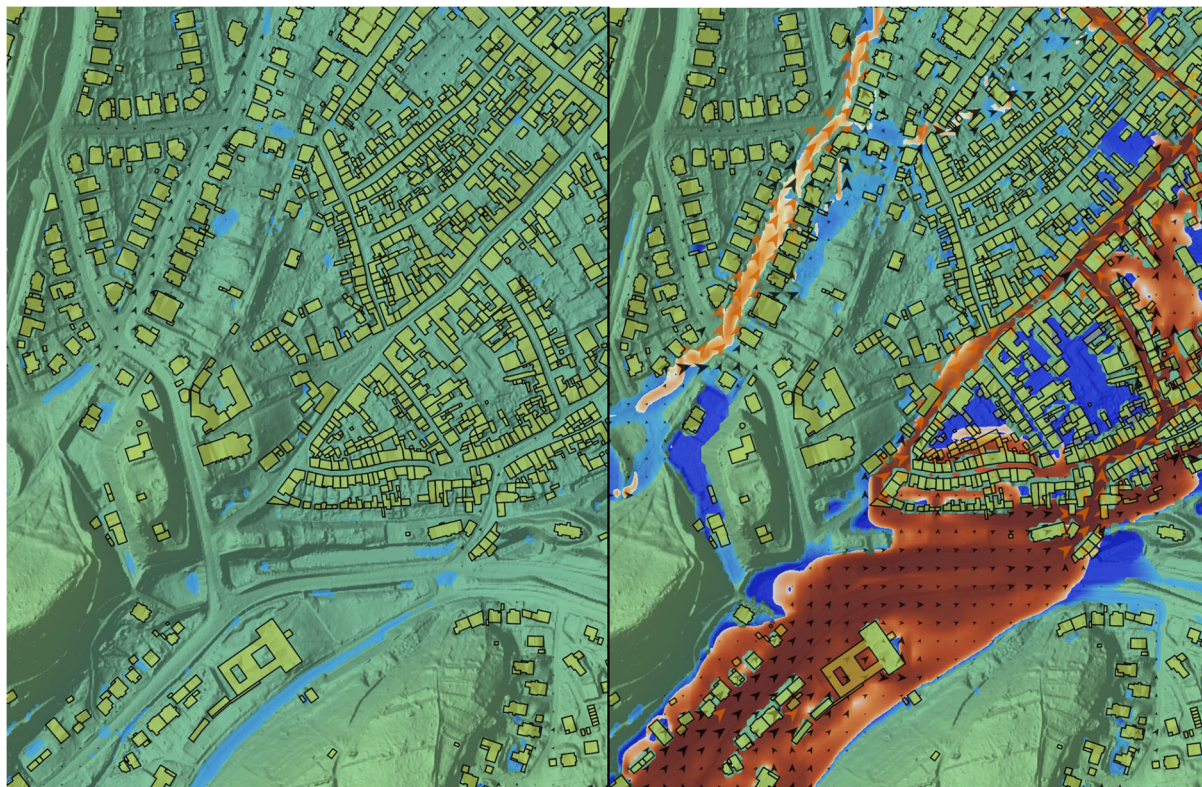


Abb. 3: Simulation des Oberflächenabflusses eines Starkregenereignisses am 22. Mai 2023 auf einem Gebiet von 56.76km². Dargestellt ist der südliche Teil der Stadt Goslar. Links: Momentaufnahme nach einer Stunde (links) und drei Stunden (rechts). Blau eingefärbt: Bereiche, in denen sich mehr als 100 mm Wasser befinden. Rot eingefärbt: Strömungsgeschwindigkeit >150 Liter pro Sekunde und Meter

Erste Implementierungen von Terrain Simplification Techniken sowie Segmentierung in Geomorphons konnten bereits erfolgreich auf das zugrundeliegende Höhenmodell angewendet werden; siehe Abb. 4. Eine solche Vereinfachung des Geländes kann Aufschluss über (hydrodynamisch) interessante und weniger interessante Geländeabschnitte liefern, die dann im hydrodynamischen Modell mit unterschiedlichen Auflösungen simuliert werden können. Eine Studie zu den Auswirkungen dieser Vereinfachungen auf die Laufzeit und auf das Ergebnis des hydrodynamischen Modells wird in Kürze folgen. Im Anschluss soll außerdem die Nutzung des statischen Abflussmodells zur Vereinfachung des Geländes zur Verbesserung der Simulationsqualität untersucht werden.

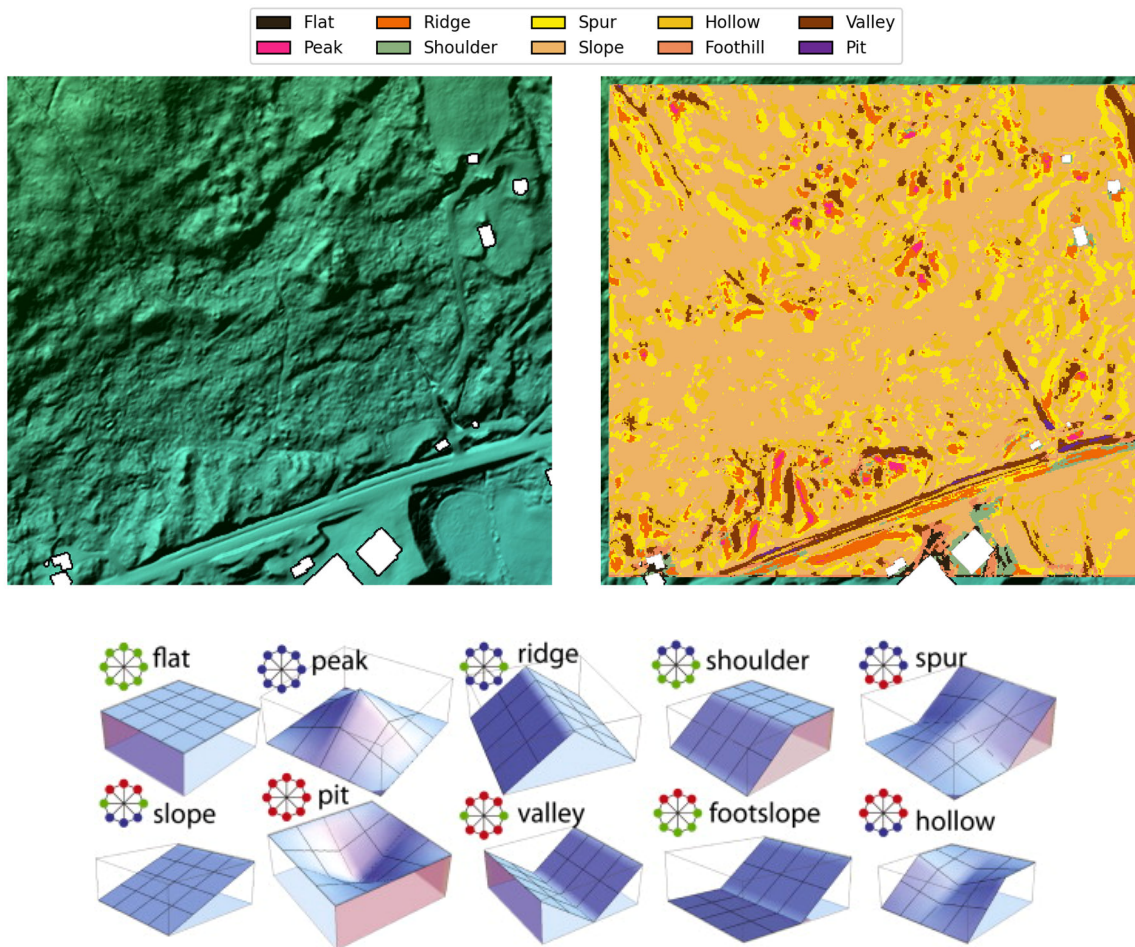


Abb. 4: (Oben) Segmentierung eines Geländeabschnitts in der Harzregion (links) in die 10 häufigsten Landformelemente (rechts). (Unten) Symbolische 3D-Morphologien und ihre entsprechenden Geomorphons für die 10 Landformelemente. (Quelle: Jasiewicz & Stepinski 2013)

5.3 SWAT+ Modell

Erste Ergebnisse der Kalibrierung des SWAT+Modells zeigen, dass das extreme Hochwasserereignis im Sommer 2017 in erster Linie durch die gemessenen Niederschlagsdaten beeinflusst wird und weniger durch die kalibrierten Modellparameter. Niedrigwasserperioden hingegen können durch eine auf Niedrigwasserphasen ausgerichtete Kalibrierung besser abgebildet werden. Die Berücksichtigung von Extremereignissen bei der Modellkalibrierung kann somit einen Beitrag zur Verbesserung der Modellierung von hydrologischen Extremen und deren Auswirkungen leisten.

5.4 Nutzung des Sensornetzwerkes beim Hochwasser im Dezember 2023

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

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 sorgt für einen verzögerten Anstieg der Pegelstände. Ein gesättigter, ausgetrockneter oder gefrorener Boden führt zu einer Erhöhung des Oberflächenabflusses. Der Mehrwert des neu eingerichteten Systems besteht darin, den genauen Zusammenhang nicht erst im Nachhinein, sondern in Echtzeit erfassen zu können. Folglich konnte der Personaleinsatz effizienter gestaltet werden. Anstatt subjektiver und sporadischer Momentaufnahmen vor Ort an z.B. 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. 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 den daraus möglichen 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. Durch die permanente Überwachung und den genauen Pegelstandverläufen können Drosselabflüsse variabel an die aktuellen Gegebenheiten, wie dem Füllstand und der Situation flussabwärts angepasst und das Anspringen des Notüberlaufs vermieden oder zumindest hinausgezögert werden.

5.5 Schwermetallbelastung

Die räumliche Analyse der Schwermetallbelastung zeigt, dass erhöhte Belastungen insbesondere in Teileinzugsgebieten mit ehemaligen Bergwerken, Hüttengeländen und Abraumhalden auftreten. Sowohl die Konzentrationen als auch der Geoakkumulationsindex nach FÖRSTNER & MÜLLER (1981) zeigen dies deutlich. Hierbei konnten deutliche Belastungen mit Zink, Nickel und Blei nachgewiesen werden, insbesondere im Zusammenhang mit ehemaligen Bergwerken und Halden.

6 Fazit und Ausblick

Im BMBF-geförderten Projekt EXDIMUM werden Daten aus verschiedenen Quellen kombiniert und digitale Modelle für die Untersuchung der Wasserressourcen erstellt. Mittels dieser Modelle wird es Entscheidungsträgern möglich, aktuelle Pegelstände einzusehen und auf Basis des erwarteten Niederschlags deren künftige Entwicklung prognostizieren zu können. Die in EXDIMUM zur Anwendung gebrachte Verschmelzung von komplementären Daten und Modellen führt zu einem Gesamtbild, das räumliche wie zeitliche Skalen geeignet miteinander verknüpft, um kurz- wie langfristige Handlungsentscheidungen treffen zu können. Verfahren des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz werden mit etablierten hydraulischen und hydrologischen Modellen verknüpft und mit terrestrisch erhobenen Daten kalibriert. Neben individuellen Forschungs- und Entwicklungsbeiträgen ergeben sich aus dem Zusammenspiel der beteiligten Disziplinen neue, vielversprechende Ansätze, die während der verbleibenden Projektlaufzeit untersucht werden sollen.

Die Projektergebnisse sollen Entscheidungsträgern dazu dienen, künftig besser auf Extremwetter-Ereignisse im Harz vorbereitet zu sein. Während eines Starkregenereignisses soll das Modellsystem die jeweilige Lage gut abbilden, damit Entscheidungen des Wassermanagements informiert getroffen werden können. Zugleich können mit Hilfe der hochauflösenden, dynamischen Abflussmodellierung szenarien-basierte Analysen durchgeführt werden, um den Einfluss möglicher baulicher Maßnahmen auf die hydrologischen Auswirkungen von Extremniederschlägen bewerten zu können. Dies soll künftig bei der Planung von Rückhaltebecken und anderen Retentionsanlagen helfen, indem Standort, Rückhaltevolumen und steuerbarer Abfluss individuell an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

Für die dynamische Abflussmodellierung wird derzeit untersucht, inwieweit Geometrien auf Basis eines statischen Abflussmodells vereinfacht werden können. So wird angenommen, dass Zellen in der Nähe eines Fließweges einen höheren Einfluss auf das Ergebnis eines hydrodynamischen Modells haben, als Zellen, die weiter von einem Fließweg entfernt sind. Eine Anpassung der Auflösung auf Basis dieser Distanz ist daher ein vielversprechender Ansatz, der gemeinsam mit den anderen vorgestellten Verfahren im Zuge des Projektes untersucht wird. Der meso-skalige SWAT+ - Ansatz, der für die Modellierung des Wasserhaushaltes auch auf Landbedeckungsdaten der Vergangenheit zurückgreift, und Landnutzungsänderungen räumlich verteilt berücksichtigt, soll helfen, mittelfristig Maßnahmen zur Verbesserung der Klimaresilienz abzuleiten und zu testen, wie beispielsweise eine Aufforstung mit an Dürreperioden angepassten Baumarten. Für die Modellierungen auf beiden räumlichen Skalen arbeiten wir daran, auch die Bodenfeuchte flächendeckend aus Fernerkundungsdaten abzuleiten. Diese Variable hat einen großen Einfluss auf das Abflussverhalten und ist zudem in Dürreperioden sehr relevant. Außerdem wird ein Verfahren zur Extraktion von Wasserflächen aus den gegenüber Sentinel zeitlich und räumlich höher aufgelösten Daten von Planet (<https://www.planet.com/>) entwickelt.

Bodensensorik, die über das gesamte Projektgebiet verteilt und vernetzt ist, liefert wichtige Parameterwerte in Echtzeit. Diese Information dient in kritischen Lagen zur Beurteilung und Entscheidungsfindung, wie bereits beim jüngsten Hochwasser gezeigt. Die Daten werden aber auch zur langfristigen Validierung der Modelle genutzt. Die räumlich-verteilten Schwermetalluntersuchungen zeigen hohe Belastungen, insbesondere in der Nähe ehemaliger Bergwerke und Halden. In Kombination mit der Modellierung des Sedimentaustrags mit SWAT+ soll die Verlagerung der Schwermetalle im Untersuchungsgebiet besser abgeschätzt werden.

7 Literaturverzeichnis

- ALEM, A. & KUMAR, S., 2020: Deep learning methods for land cover and land use classification in remote sensing: A review. Proceedings of the 2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization, Noida, India, 4-5 June, 903-908, <https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197824>.
- ANASTASI, G., FALCHI, A., PASSARELLA, A., CONTI, M. & GREGORI, E., 2004: Performance Measurements of Motes Sensor Networks. 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM), 174-181.
- ARGE, L. LOWE A., SVENDSEN, S.C. & AGARWAL P. K., 2023: 1D and 2D Flow Routing on a Terrain. ACM Trans. Spatial Algorithms Syst. **9**(1), 3-39.

- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S. & WILLIAMS, J.R., 1998: Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **34**, 73-89.
- BIEGER, K., ARNOLD, J.G., RATHJENS, H., WHITE, M.J., BOSCH, D.D., ALLEN, P.M., VOLK, M. & SRINIVASAN, R., 2017: Introduction to SWAT+, a Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **53**(1), 115-130.
- BRADBROOK, K., WALLER, S. & MORRIS, D., 2005: National floodplain mapping: datasets and methods--160,000 km in 12 months. *Natural Hazards*, 103-123.
- CATTANI, M., BOANO, C. & RÖMER, K., 2017: An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, **6.2**, 7.
- FÖRSTNER, U. & MÜLLER, G., 1981: Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact. *GeoJournal*, **5**, 417-432.
- GAO, S., COLLECUTT, G., SYME, W. J. & RYAN, P., 2020: High resolution numerical modelling of tsunami inundation using quadtree method and GPU acceleration. In *Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress*.
- HARDY, R.J., BATES, P.D. & ANDERSON, M.G., 1999: The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments, *Journal of Hydrology*, **216**(1-2), 124-136.
- HUNTER, N.M., BATES, P.D., NEELZ, S., PENDER, G., VILLANUEVA, I., WRIGHT, N.G., LIANG, D., FALCONER, R.A., LIN, B., WALLER, S., CROSSLEY, A.J. & MASON, D.C., 2008: Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the ICE -Water Management*, **161**(1), 13-30.
- JASIEWICZ, J. & STEPINSKI, T. F., 2013: Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, **182**, 147-156.
- LATTICE SEMICONDUCTOR, 2023: CrossLink-NX Family Datasheet, <https://www.latticesemi.com/Products/FPGAandCPLD/CrossLink-NX>, letzter Zugriff 20.01.2024.
- RONNEBERGER, O., FISCHER, P. & BROX, T., 2015: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, **9351**, 234-241, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- SONG, J., GAO, S., ZHU Y. & MA, C., 2019: A survey of remote sensing image classification based on CNNs. *Big Earth Data*, **3**(3), 232-254, <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1657720>.
- SZAFRANSKI, D., BOUCHUR, M. & REINHARDT, A., 2022: Investigating Constructive Interference for LoRa-based WSNs. 19. GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN), 25-28.
- SZAFRANSKI, D. & REINHARDT, A., 2023: 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, <https://doi.org/10.1109/WoWMoM57956.2023.00069>.
- VALI, A., COMAI, S. & MATTEUCCI, M., 2020: Deep Learning for Land Use and Land Cover Classification Based on Hyperspectral and Multispectral Earth Observation Data: A Review. *Remote Sensing*, **12**, 2495, <https://doi.org/10.3390/rs12152495>.
- WAGNER, P.D., BIEGER, K., ARNOLD, J. & FOHRER, N., 2022: Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+. *Hydrological Processes*, **36**(5), e14589.

- WAGNER, P.D., FIENER, P., WILKEN, F., KUMAR, S. & SCHNEIDER, K., 2012: Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, **464**, 388-400.
- ZANAGA, D., VAN DE KERCHOVE, R., DAEMS, D., DE KEERSMAECKER, W., BROCKMANN, C., KIRCHES, G., WEVERS, J., CARTUS, O., SANTORO, M., FRITZ, S., LESIV, M., HEROLD, M., TSENBABAZAR, N.E., XU, P., RAMOINO, F. & ARINO, O., 2022: ESA WorldCover 10 m 2021 v200, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>.
- ZANAGA, D., VAN DE KERCHOVE, R., DE KEERSMAECKER, W., SOUVERIJS, N., BROCKMANN, C., QUAST, R., WEVERS, J., GROSU, A., PACCINI, A., VERGNAUD, S., CARTUS, O., SANTORO, M., FRITZ, S., GEORGIEVA, I., LESIV, M., CARTER, S., HEROLD, M., LI, LINLIN, TSENBABAZAR, N.E., RAMOINO, F. & ARINO, O., 2021: ESA WorldCover 10 m 2020 v100, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.