

# Wasser als Risikofaktor

Sergiy Vorogushyn<sup>1</sup>, Heidi Kreibich<sup>1</sup>, Dung Viet Nguyen<sup>1</sup>, Nivedita Sairam<sup>1</sup>, Michael Dietze<sup>1,2</sup>, Bruno Merz<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam

<sup>2</sup> Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Geographie

<sup>3</sup> Universität Potsdam, Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

Das Wasser in der Landschaft weist eine hohe raum-zeitliche Variabilität auf. Immer wieder kommt es zu hydrologischen Extremen wie Dürren und Hochwasser. Treten Hochwasser in besiedelten Gebieten auf, können sie sich zu Hochwasserkatastrophen entwickeln. In diesem Beitrag beleuchten wir das Risikopotenzial des Wassers und diskutieren, was wir als Gesellschaft tun können, um diese Risiken besser zu verstehen und zu minimieren.

**W**asser ist auf der Erdoberfläche höchst unterschiedlich verteilt. Die trockensten Wüsten auf der Erde erhalten über Monate oder sogar Jahre keine nennenswerten Niederschläge. In den feuchten Gebieten fallen mehrere Tausend Liter Regen pro Quadratmeter im Jahr. Auch die zeitliche Verteilung des Wassers ist unterschiedlich, und wenn eine große Niederschlagsmenge in kurzer Zeit auf nassen Boden fällt, verwandeln sich Flüsse in reißende Ströme. Treffen die Wassermassen auf von Menschen besiedelte Gebiete, wird das Wasser zum Gefährder – nicht nur für Gebäude und Infrastrukturen, sondern auch für Leib und Leben (Abb. 1). Die ökonomischen Schäden durch Hochwasser werden weltweit auf etwa 100 Mrd. Euro pro Jahr geschätzt (UNDRR, 2015).

Das Wasser wird zum Risiko, wenn hohe Wasserstände bzw. hohe Fließgeschwindigkeiten auf exponierte Werte wie Wohngebäude, Eisenbahnlinien oder Produktionshallen treffen und diese einen Teil ihrer Funktionen bzw. Werte verlieren oder komplett zerstört werden. Somit setzt sich das Hochwasserrisiko aus drei Komponenten zusammen: Gefährdung,

## Kernaussagen

- Hochwasser entfalten ihr Risikopotenzial, wenn sie auf exponierte und anfällige Gebäude, Infrastrukturen und unvorbereitete Menschen treffen.
- Obwohl die Häufigkeit und Intensität der Hochwasser im Zuge des Klimawandels in vielen Regionen zunehmen, können technische Hochwasserschutzmaßnahmen und eine Verringerung von Exposition und Vulnerabilität zu erwartende Schäden zum Teil abpuffern.
- Mit einem kombinierten prozessbasierten und empirischen Ansatz lassen sich das regionale Hochwasserrisiko quantifizieren und effektive Maßnahmen zur Risikominimierung identifizieren.

Exposition und Vulnerabilität. Das Risiko wird oft als jährlicher Schadenserwartungswert ausgedrückt und stellt einen mittleren Schaden dar, der durch kleinere und größere Hochwasser im Laufe eines Jahres zu erwarten ist. Gefährdung beschreibt die Intensität der Hochwasserereignisse und bezieht sich z. B. auf Abfluss oder Wasserstand. Exposition umfasst die Menschen sowie ihre Gebäude und Werte, die vom Hochwasser betroffen sind. Vulnerabilität beschreibt die Anfälligkeit von Menschen und

Objekten, durch Überschwemmung geschädigt zu werden.

Risiko ist eine dynamische Größe und unterliegt ständiger Veränderung, sobald sich eine der drei Komponenten ändert. Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ untersuchen wir die Dynamik von Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität und deren Einfluss auf Hochwasserrisiken. In einer Synthesestudie haben Merz et al. (2021) dutzende wissenschaftliche Arbeiten analysiert, um ein welt-



Abb. 1: Ahr-Hochwasser im Juli 2021 (Foto: Christian - stock.adobe.com)

weites Bild der Hochwassertrends in den letzten Jahrzehnten zusammenzustellen (Abb. 3).

Diese Trends spiegeln die Dynamik der Hochwassergefährdung wider und resultieren aus den vielfältigen Wechselwirkungen von klimatischen Faktoren, Landnutzungsänderungen und anthropogenen Eingriffen in Einzugsgebieten. Es ergibt sich ein komplexes Muster von steigenden und fallenden Trends. Im Nordwesten Europas inklusive Deutschland zeigen sich überwiegend steigende Hochwassertrends. Merz et al. (2021) fanden auch, dass die Hochwasserrisiken weltweit überwiegend steigen, was vor allem auf Wirtschaftswachstum bzw. Wertesteigerung und Bevölkerungswachstum zurückzuführen ist. Fallende Trends in der Hochwassergefährdung können durch steigende Exposition und Vulnerabilität ausgeglichen oder sogar gedreht werden. Das gleiche gilt auch umgekehrt. Alle Risikokomponenten können sich verstärken oder kompensieren. Die Hochwasserrisikoforschung am GFZ fokussiert unter anderem darauf, die Rollen und die Dynamik von Risikokomponenten zu entschlüsseln und effektive Maßnahmen zur Risikoreduzierung zu identifizieren.

### Regionales Hochwassermodell für Deutschland

Die Quantifizierung von Hochwasserrisiken und der Rolle der Risikokomponenten erfordert die Entwicklung komplexer Modelle, welche die gesamte

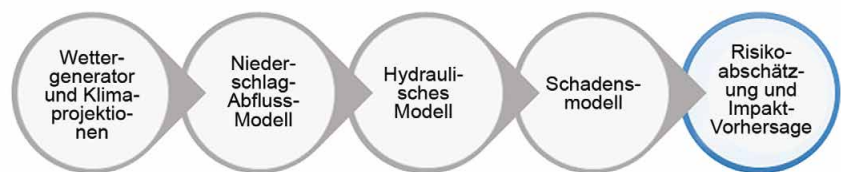


Abb. 2: Schematische Darstellung des Regionalen Hochwassermodell Deutschlands (RFM)

Prozesskette – vom auslösenden meteorologischen Ereignis über die Abflussprozesse im Einzugsgebiet und Gewässernetz bis zu Überflutung sowie Schaden – abdecken. Mit dem am GFZ entwickelten Regionalen Hochwassermodell für Deutschland (Regional Flood Model – RFM, Abb. 2) kann diese Prozesskette abgebildet und eine Risikoabschätzung bzw. Hochwasser-Impakt-Vorhersage vorgenommen werden.

Das RFM besteht aus einem stochastischen Wettergenerator, der lange synthetische Niederschlagszeitreihen erzeugt, die zwar in dieser Weise nicht aufgetreten sind, aber in ihren statistischen Eigenschaften den realen Ereignissen ähneln. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel von einem synthetischen Starkregen an einem Tag über Deutschland (rechts) und ein ähnliches, reales Ereignis während des Hochwassers im August 2002 (links).

Der Input des Wettergenerators wird von einem Niederschlag-Abfluss-Modell und einem hydraulischen Modell in die Überflutungsflächen umgerechnet, die als Grundlage für Schadensabschätzung und Risikobewertung dienen. Die Modell-

kette kann auch mit einer Wetter- bzw. Hochwasserabflussvorhersage angetrieben werden und somit eine Impakt-Vorhersage ermöglichen.

Mit der RFM-Modellkette konnte eine erste einheitliche regionale Risikoabschätzung für die fünf großen Einzugsgebiete in Deutschland durchgeführt werden (Abb. 5, Sairam et al., 2021). Im Unterschied zu den Gefährdungsabschätzungen der einzelnen Bundesländer im Rahmen der Umsetzung der Hochwasser-rahmenrichtlinie wurden eine einheitliche, kontinuierliche Modellsimulation über die Bundesländergrenzen hinweg angewandt und die Gefährdungsaussagen in Risikoabschätzungen für die drei Sektoren Privathaushalte, Gewerbe/Industrie und Landwirtschaft transferiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das größte Risiko in Deutschland im kommerziellen Sektor besteht. Während die Schadens erwartungswerte für den privaten Sektor in den drei größten Einzugsgebieten (Elbe, Rhein, Donau) ähnlich sind, stehen die Werte für den kommerziellen und landwirtschaftlichen Sektor im Elbeinzugsgebiet hervor.



Kontakt: Sergiy Vorogushyn  
(sergiy.vorogushyn@gfz-potsdam.de)

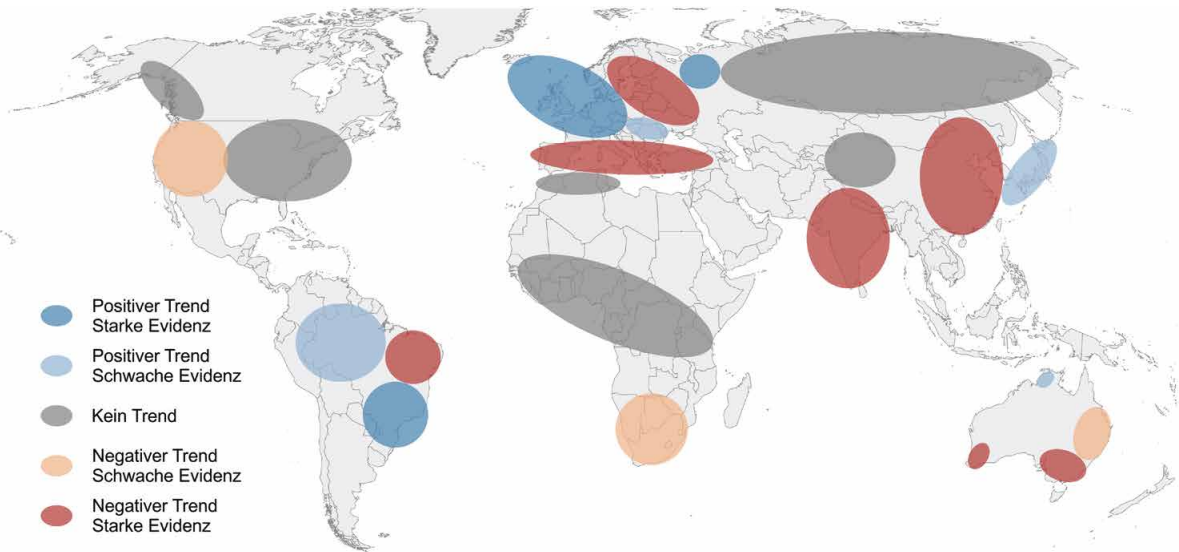


Abb. 3: Beobachtete Trends in maximalen jährlichen Abflüssen in den letzten Dekaden – Synthese großskaliger Trendstudien basierend auf wissenschaftlicher Literatur (nach Merz et al., 2021). Positive Trends deuten auf die Zunahme und negative Trends auf die Abnahme der Hochwasserabflüsse hin.

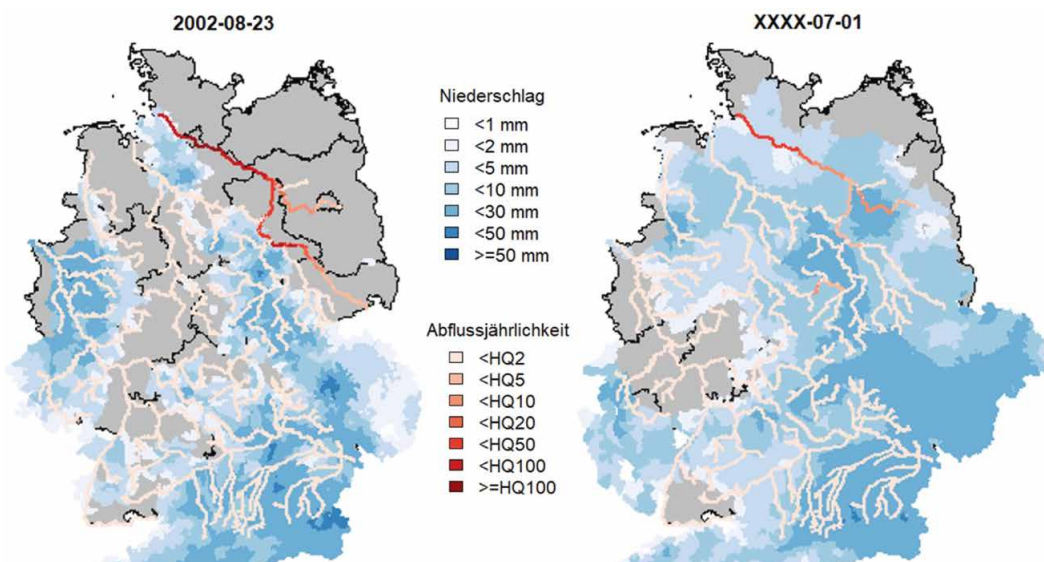


Abb. 4: Vergleich von Niederschlagsmustern an einem Tag über Deutschland während des Hochwassers im August 2002 (links) und erzeugt mit dem stochastischen Wettergenerator (rechts). Abflussjährlichkeit (HQ) stellt die Abflüsse dar, die einer entsprechenden Wiederkehrperiode (Jährlichkeit) von 2, 5, 10 usw. Jahren entsprechen. Beispiel: ein 10-jähriger Abfluss (HQ10) wird im Durchschnitt alle 10 Jahre überschritten.

Der Aufbau von komplexen Hochwasser-risikomodellen basiert nicht nur auf der Analyse zahlreicher gemessener hydro-meteorologischer Datensätze wie Niederschlag und Abfluss, sondern erfordert auch umfassende Ereignisanalysen vor Ort und systematische Schadenserhebungen nach einem Hochwasser. Diese Informationen erlauben es, die für das

Hochwasserrisiko relevanten Prozesse zu identifizieren und zu quantifizieren und die Risikomodelle zu verbessern sowie zu kalibrieren. In solchen Fällen kommt am GFZ das „Hazard and Risk Team“ (HART) zum Einsatz. Auch bei der Hochwasserkatastrophe in Deutschland im Juli 2021 war das Team, bestehend aus Geomorpholog:innen, Hydrolog:innen,

Seismolog:innen und Fernerkundler:innen, zusammen mit universitären Partnern und Behörden im Einsatz (siehe Infokasten „Ahr-Hochwasser 2021“). Es hat sich gezeigt, dass bei dieser Katastrophe nicht nur die enormen Regensmengen und die Abflussbildung eine wichtige Rolle gespielt haben, sondern auch die Erosionsprozesse, Gehölztrans-



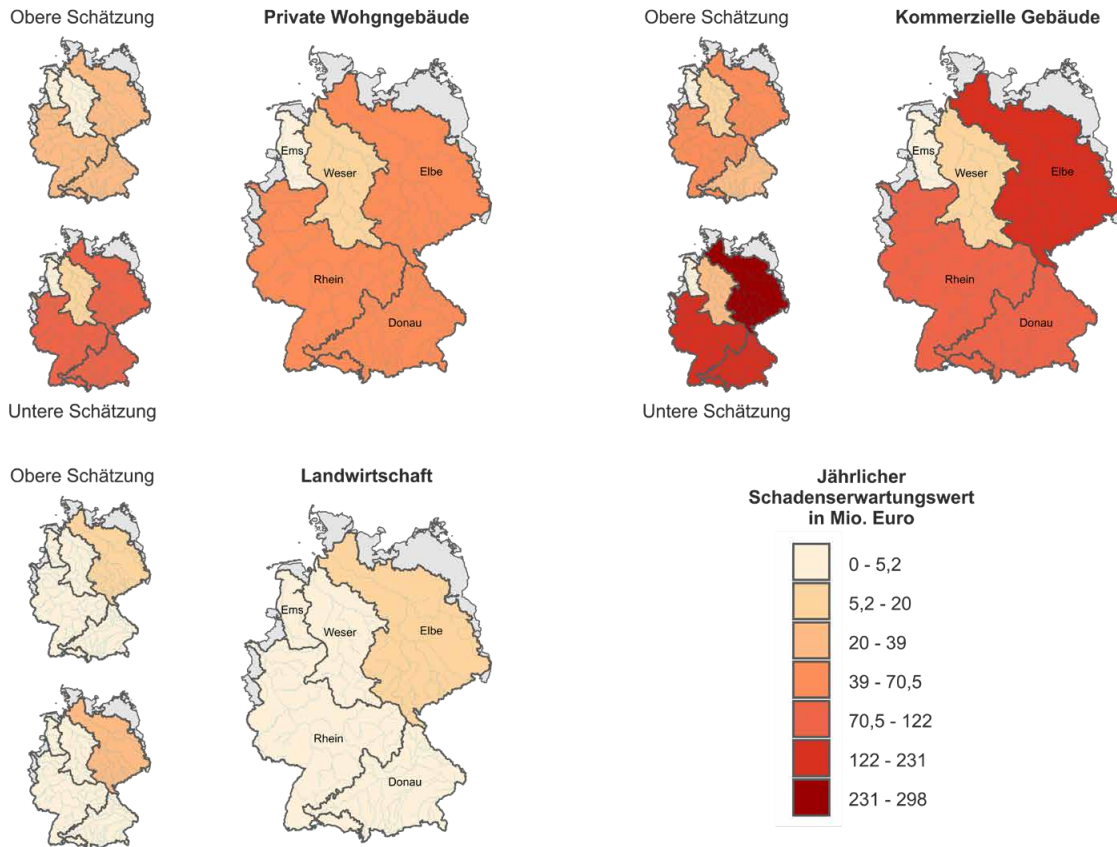


Abb. 5: Jährliche Schadenserwartungswerte in fünf Einzugsgebieten in Deutschland (Elbe, Rhein, Donau, Weser, Ems), differenziert nach den drei Sektoren: private und kommerzielle Wohngebäude sowie Landwirtschaft (nach Sairam et al., 2021). Die unteren und oberen Schätzungen zeigen den 90 %-Unsicherheitsbereich rund um den Median.

port und Verklauung von Brücken einen maßgeblichen Anteil bei den Rekordwasserständen und Überflutungen hatten (Dietze et al., 2022).

### Hochwassermanagement kann Schäden verringern

Eine akribische Schadensaufnahme und die Analyse von schadensbeeinflussenden Faktoren sind der Schlüssel zur Identifizierung von effektiven Maßnahmen zur Schadensreduktion. So zeigten Sairam et al. (2019) nach der Analyse von fast 1000 Schadensfällen aus vier Hochwasserereignissen in Deutschland, dass private Hochwasservorsorge (z. B. die hochwasserangepasste Gebäudenutzung) im Schnitt 11 000 bis 15 000 Euro Schadenssumme reduziert. Das entspricht etwa 27 % des mittleren Wohngebäudeschadens. Eine weitere Analyse von mehr als 4000 Schadensfällen aus sechs Hochwassern in Deutschland offenbarte, dass Hochwasserwarnungen allein

nicht ausreichen, um Schäden substantiell zu reduzieren. Nur wenn die Betroffenen wissen, was sie nach dem Empfang der Hochwasserwarnung zu tun haben und dies umsetzen können, führt das zu einer signifikanten Reduktion von wirtschaftlichen Schäden (Kreibich et al., 2021). Und gerade jene Haushalte, die bereits Hochwasservorsorge betrieben haben, wissen, wie sie im Katastrophenfall reagieren müssen. Dieser Zusammenhang unterstreicht die Notwendigkeit von gezielten Informationen, regelmäßigen Trainings und finanziellen Anreizen zur Hochwasservorsorge. Auch in einer großangelegten internationalen Studie, die mehrere sogenannte „paired events“ – zwei aufeinander folgende Hochwasserereignisse – analysierte, zeigte sich, dass Hochwassermanagement sehr effektiv die Schäden beim zweiten Ereignis reduzieren kann (Kreibich et al., 2022). Die Schäden können sowohl durch technische Hochwasserschutzmaßnahmen wie Deiche und Rückhaltebecken als auch

durch Reduzierung der Exposition und Vulnerabilität erreicht werden. Die Betroffenen lernten aus vergangenen Ereignissen. Wenn das zweite Ereignis jedoch das vorherige in seinem Ausmaß deutlich übertraf, offenbarten sich Defizite im Hochwassermanagement – mit Ausnahme von zwei Fällen waren die Schäden größer. Diese Ausnahmefälle, Donau-Hochwasser und Sturzfluten in Barcelona, Spanien, zeigen, dass hohe Investitionen sowohl in das technische als auch nichttechnische Hochwassermanagement dazu beitragen, selbst nie dagewesenen Extremereignissen effektiv begegnen zu können (Kreibich et al., 2022). Es bleibt also entscheidend, bei den Investitionen in Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge auch in hochwasserarmen Zeiten nicht nachzulassen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels wichtig, der die Wahrscheinlichkeit von nie dagewesenen Extremen in vielen Regionen der Erde erhöht.



## Infokasten: Ahr-Hochwasser 2021

Das Hochwasser vom Juli 2021 hat mehrere Flussgebiete im Westen Deutschlands massiv getroffen. Es hat auf schreckliche Art gezeigt, wie unvorbereitet Gesellschaft, Politik und Wissenschaft waren und mit welcher nicht geahnten Intensität und Geschwindigkeit enorme Regenmengen zu katastrophalen Hochwässern führten. Dabei waren die zu erwartenden Regenmengen Tage vorher bekannt, hydrologische Modelle und zahlreiche Pegelmessstellen in Betrieb und Informationsketten sowie Verantwortlichkeiten geregelt. Dennoch entwickelte sich am 14. und 15. Juli 2021 ein massives, schnell voranschreitendes Hochwasser, welches mehrere enge Täler der Eifel über viele Stunden hinweg überflutete und mehr als 180 Todesopfer allein in Deutschland forderte.

Wenngleich der mediale Fokus, die Rettungsmaßnahmen und Schadensdokumentation vor allem die Täler der Hauptflüsse Ahr und Erft umfassten, waren es doch die oberen Einzugsgebiete, die Quelltäler der kleinen Nebenflüsse, in denen das Hochwasser seine Unberechenbarkeit, Dimension und Geschwindigkeit entwickelte. Genau in diesen oberen Einzugsgebieten hatten Wissenschaftler:innen des GFZ wenige Tage nach dem Hochwasserereignis systematisch die Spuren der vergangenen Prozesse dokumentiert, bevor diese wieder verschwanden. Spuren des Hochwassers waren z. B. vom Wasser mitgeschwemmte Gräser, Einschlagmarken von Treibgut mehrere Meter über dem Flussniveau, aber auch mit

Sediment verstopfte Entwässerungsröhre, geborstene Drainageleitungen und Ablagerungen von Schlammlawinen, die sich von den Hängern zahlreicher Täler gelöst hatten. Durch diese detaillierte „Gelände-Forensik“ konnte ein wertvolles Archiv an Informationen zum Ablauf und zur Intensität des Hochwasserereignisses aufgebaut werden. Doch dieses Archiv ist nur punktuell. Um eine flächendeckende Analyse von Hochwasserspuren zu erreichen, bedarf es hochauflösender 3D-Informationen (Abb. 6), die meist aus Laserscannmessungen von Flugzeugen gewonnen werden (airborne laser scanning, ALS).

Solche ALS-Kampagnen sind teuer und haben meist mehrere Monate Vorlauf. In diesem dramatischen Fall musste aber schnell gehandelt werden. Das GFZ stellte daher ein so genanntes Hazard and Risk Team (HART) aus Expert:innen zusammen wie bei anderen Naturkatastrophen in der Vergangenheit. Mit diesem Instrument können kurzfristig Mittel mobilisiert werden, um essentielle Daten zu Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüchen und eben Hochwassern zu gewinnen, die auf den üblichen Wegen der Wissenschaftsfinanzierung nicht möglich sind. HART-Einsätze sind meist von kurzer Dauer, dienen neben der Datengewinnung dem Anschub zukünftiger Projekte und vor allem dem Aufbau von Kooperationen mit universitären und institutionellen Partnern. Mit dem HART-Einsatz „EifelloodS“ konnten in wenigen Wochen 1) eine ALS-Befliegung, 2) weitere Geländekartierungen und 3) eine

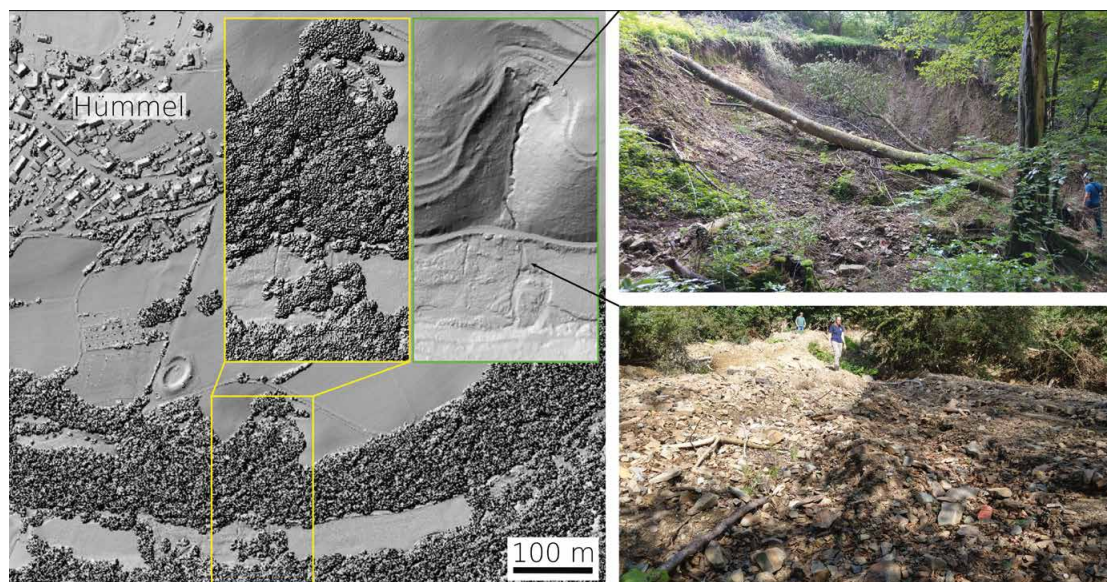


Abb. 6: 3D-Modelle der Landschaft aus Laserbefliegungsdaten und Befunde der Geländekartierung. Im Hintergrund ist ein Oberflächenmodell einschließlich Bäumen und Häusern zu sehen, im Norden der Ort Hümmel und im Süden das waldbestandene Tal des Armuthsbachs. Gelb umrissen ist eine Vergrößerung eines bewaldeten Hangs, dessen Veränderung durch eine Hangmure erst nach Herausrechnen der Oberflächenbedeckung sichtbar wird (Grün umrissen). Die Fotos rechts zeigen die direkten Geländebefunde dieser Hangmure (Anriss oben, Ablagerungen unten) mit Personen als Größenvergleich. (Fotos: M. Dietze, GFZ)

Befragung betroffener Einwohner:innen (beginnend im Sommer 2022) organisiert werden.

Die koordinierte Zusammenarbeit und Einbindung von Landesämtern, verantwortlichen Behörden und lokalen Entscheidungsträgern hat unter anderem rasch ergeben, dass die Schäden des Ereignisses nicht allein durch schnell fließendes Wasser herbeigeführt wurden. Vielmehr war es die Interaktion zwischen durchtränktem Untergrund und oberflächlich abfließendem (und sich einschneidendem) Wasser, aber vor allem die verstärkende Wirkung von gravitativen Massenbewegungen und Gehölzen, die systematisch zu Blockaden der kleinen Flüsse geführt haben. Neben diesen eher natürlichen Elementen einer dynamischen Landschaft führten Eingriffe des Menschen in vielen Fällen zu einer Verstärkung dieser Effekte: Das weit verzweigte, oft hangparallel angelegte Waldwegenetz hat abfließendes Hangwasser gesammelt und dann konzentriert freigesetzt; Wasserdurchführungen durch Waldwege haben, nachdem sie verstopft waren, ganze Seen aufgestaut; Rohrleitungen zum Trockenlegen von Wiesen haben zunächst Wasser viel schneller zu Flüssen geleitet und, nachdem sie verfüllt oder gebrochen waren, durch Wasserinjektion in den Boden zur Hangdestabilisierung beigetragen. Diese Fallbeispiele gilt es jetzt im Zuge der

HART-Datenauswertung zu systematisieren und durch Modellansätze zu generalisieren, um deren potenziellen Einfluss auf zukünftige Hochwasser besser abschätzen und letztlich rechtzeitig geeignete Vorkehrungen anstreben zu können.

Im HART-Projekt EifelfloodS starten nun, nach der multiskaligen Datenaufnahme, eine Reihe von fachübergreifenden Forschungsaufgaben: wichtige Schadensprozesse werden identifiziert und Schadensmodelle weiterentwickelt, detaillierte Einblicke in die Einzugsgebietsreaktion, den zeitlichen Ablauf und die Entwicklung der Hochwasserwellen werden simuliert, aus den Befliegungsdaten werden aktuelle Flussquerschnittsdaten gewonnen, eine Grundlage für alle nachkommenden Hochwasservorhersageansätze. Zudem werden Effekte von Totholz für den Abfluss untersucht, abschnittsweise die genauen Volumina, Transportwege und Zusammensetzungen der erodierten Sedimente bestimmt und die Kopplungsmechanismen zwischen Hängen und Flüssen bewertet. All diese eng miteinander verflochtenen Fragestellungen bedürfen einer partnerschaftlichen Herangehensweise mit gemeinsam zur Verfügung stehenden Daten und Analysewerkzeugen.

## Literatur

- Dietze, M., Bell, R., Ozturk, U., Cook, K. L., Andermann, C., Beer, A. R., Damm, B., Lucia, A., Fauer, F. S., Nissen, K. M., Sieg, T., Thieken, A. H. (2022). More than heavy rain turning into fast-flowing water – a landscape perspective on the 2021 Eifel floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (6), 1845–1856. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1845-2022>
- Kreibich, H., Hudson, P., Merz, B. (2021). Knowing What to Do Substantially Improves the Effectiveness of Flood Early Warning. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102 (7), E1450–E1463. <https://doi.org/10.1175/bams-d-20-0262.1>
- Kreibich, H., Van Loon, A. F., Schröter, K., Ward, P. J., Mazzoleni, M., Sairam, N., Abeshu, G. W., Agafonova, S., AghaKouchak, A., Aksoy, H., Alvarez-Garretton, C., Aznar, B., Balkhi, L., Barendrecht, M. H., Biancamaria, S., Bos-Burgering, L., Bradley, C., Budiyo, Y., Buytaert, W., Capewell, L., Carlson, H., Cavus, Y., Couasnon, A., Coxon, G., Daliakopoulos, I., de Ruiter, M. C., Delus, C., Erfurt, M., Esposito, G., François, D., Frappart, F., Freer, J., Frolova, N., Gain, A. K., Grillakis, M., Grima, J. O., Guzmán, D. A., Huning, L. S., Ionita, M., Kharlamov, M., Khoi, D. N., Kieboom, N., Kireeva, M., Koutroulis, A., Lavado-Casimiro, W., Li, H.-Y., Llasat, M. C., Macdonald, D., Mård, J., Mathew-Richards, H., McKenzie, A., Mejia, A., Mendiondo, E. M., Mens, M., Mobini, S., Mohor, G. S., Nagavciuc, V., Ngo-Duc, T., Thao Nguyen Huynh, T., Nhi, P. T. T., Petrucci, O., Nguyen, H. Q., Quintana-Seguá, P., Razavi, S., Ridolfi, E., Riegel, J., Sadik, M. S., Savelli, E., Sazonov, A., Sharma, S., Sörensen, J., Arguello Souza, F. A., Stahl, K., Steinhausen, M., Stoezl, M., Szalińska, W., Tang, Q., Tian, F., Tokarczyk, T., Tovar, C., Tran, T. V. T., Van Huijgevoort, M. H. J., van Vliet, M. T. H., Vorogushyn, S., Wagener, T., Wang, Y., Wendt, D. E., Wickham, E., Yang, L., Zambrano-Bigiarini, M., Blöschl, G., Di Baldassarre, G. (2022). The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 608 (7921), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2 (9), 592–609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>
- Sairam, N., Brill, F., Sieg, T., Farrag, M., Kellermann, P., Nguyen, V. D., Lütke, S., Merz, B., Schröter, K., Vorogushyn, S., Kreibich, H. (2021). Process-Based Flood Risk Assessment for Germany. *Earth's Future*, 9 (10), e2021EF002259. <https://doi.org/10.1029/2021ef002259>
- Sairam, N., Schröter, K., Lütke, S., Merz, B., Kreibich, H. (2019). Quantifying Flood Vulnerability Reduction via Private Precaution. *Earth's Future*, 7 (3), 235–249. <https://doi.org/10.1029/2018ef000994>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Global assessment report on disaster risk reduction 2015 : making development sustainable : the future of disaster risk management*.