



Werden die Hochwasser größer? Ursachen, Trends und Handlungsoptionen

Günter Blöschl

Angenommen: 6. August 2025 / Online publiziert: 21. August 2025
 © The Author(s) 2025, korrigierte Publikation 2025

Zusammenfassung Die Hochwassergefahr an Flüssen wird mit wachsender Besorgnis diskutiert, insbesondere die Frage ob die Hochwassergefahr zugenommen hat und in den kommenden Jahren weiter steigen wird. Dieser Artikel beleuchtet drei zentrale Einflussfaktoren: Erstens Landnutzungsänderungen wie Abholzung, Urbanisierung und Bodenverdichtung. Diese können in kleinen Einzugsgebieten aufgrund verminderter Infiltration zu erhöhten Hochwasserspitzen führen. In größeren Gebieten ist hingegen die Bodensättigung entscheidender, weshalb der Einfluss der Landnutzung dort meist gering ausfällt. Zweitens wasserbauliche Eingriffe wie Flussbegradigungen, Hochwasserschutzdämme und Staudämme. Diese sind insbesondere bei mittleren Hochwasserereignissen stromabwärts von Bedeutung. Drittens der Klimawandel. Zunehmende kurze Starkregen verstärken Hochwasser vor allem in kleinen Einzugsgebieten. In größeren Gebieten spielen dagegen Veränderungen bei längeren Starkregenereignissen eine größere Rolle, und diese weisen komplexere Muster auf. Hinzu kommen weitere Faktoren wie Verdunstung und Schneeschmelze, die sowohl zu steigenden als auch zu sinkenden Hochwassertrends führen können. Für ein effektives Risikomanagement ist es entscheidend, alle drei Faktoren differenziert zu betrachten. Zu den Herausforderungen zählt die Bewältigung von sogenannten Megahochwassern. Dabei spielen nicht-bauliche Maßnahmen eine zentrale Rolle.

Schlüsselwörter Hochwasserrisiko · Landnutzungsänderungen · Klimawandel · Hochwassertrends ·

Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. mult.
 G. Blöschl (✉)
 Institut für Wasserbau
 und Ingenieurhydrologie,
 Technische Universität Wien,
 Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich
 bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Hochwasserrisikomanagement ·
 Megahochwasser · Nicht-strukturelle
 Maßnahmen

Are floods increasing? Causes, trends and management options

Abstract The risk of river flooding is being discussed with growing concern, particularly whether this risk has increased and will continue to rise in the coming years. This article examines three key contributing factors. The first are land use changes such as deforestation, urbanization, and soil compaction. These changes can lead to reduced water infiltration and therefore higher flood peaks in small catchments. In larger river basins, however, soil saturation is more important, so land use has a smaller impact. The second are hydraulic engineering interventions including river training, levees and dams. These primarily influence medium-sized flood events downstream. The third is climate change. More frequent and intense short-duration rainfall increases flood risks in small catchments. In larger catchments, long-duration rainfall events are more relevant, and their changes are more complex. Additional processes such as evaporation and snowmelt can result in either increasing or decreasing flood trends. Effective risk management requires a nuanced understanding of all three factors. A major challenge lies in coping with so-called mega floods, where non-structural measures play a crucial role.

Keywords Flood risk · Land use change · Climate change · Flood trends · Flood risk management · Mega floods · Non-structural measures

1 Einleitung

Im 20. Jahrhundert verursachten Flusshochwasser weltweit durchschnittlich jährliche Schäden von 104 Mrd. US-Dollar (UNDRR 2015) und forderten etwa sieben Millionen Todesopfer (Doocy

et al. 2013). In den letzten Jahren scheinen sich die Hochwasser in Europa zu häufen. Allein im Jahr 2024 gab es mehrere schwere Ereignisse, wie die vom Sturm Boris ausgelösten Überflutungen im September, die auch Niederösterreich schwer trafen, und das große Hochwasser von Valencia im Oktober. Auch Ereignisse wie jenes im Ahrtal in Deutschland im Juli 2021, bei dem fast 200 Menschen ums Leben kamen und Schäden von mehr als 30 Mrd. € entstanden, erinnern uns auf tragische Weise daran, wie verwundbar auch Europa – trotz hoher Schutzstandards – sein kann. Wenn das Bild einer Häufung extremer Hochwasserereignisse auch durch Betrachtung größerer Regionen entstehen kann, und nicht zwingend auf der lokalen Ebene zutrifft, ist klar, dass das Hochwasserrisikomanagement zur Verringerung der negativen Auswirkungen solcher Ereignisse eine sehr wichtige gesellschaftliche Aufgabe ist.

Typische Elemente des Risikomanagements sind Vorsorge, Schutz, Bewusstseinsbildung, Vorbereitung und Nachsorge (Blöschl et al. 2015b). Vorsorgemaßnahmen können Gefahrenzonenplanung und Landnutzungsänderungen zur Erhöhung der Infiltration sein. Schutzmaßnahmen sind meist bauliche Maßnahmen wie lineare Schutzmaßnahmen (Schutzdämme) und Hochwasserrückhaltebecken. Zur Bewusstseinsbildung trägt Öffentlichkeitsarbeit bei. Zur Vorbereitung zählen Hochwasserwarnung und Katastrophenschutzpläne, und zur Nachsorge die Beurteilung von Hochwasserschäden und Ereignisdokumentation.

Eine zentrale Größe zur effizienten Umsetzung vieler dieser Maßnahmen ist der zu erwartende Wasserstand in einem bestimmten Gebiet und die damit verbundene Wahrscheinlichkeit. Verändern sich diese, sind auch die Maßnahmen zu adaptieren. Konkret gesagt müssten z. B. Schutzdämme erhöht oder die Eigenvorsorge ausgebaut werden, falls sich die Wahrscheinlichkeit erhöht und das ursprünglich

1. Landnutzungsänderungen



2. Wasserbauliche Maßnahmen



3. Klimawandel



Abb. 1 Drei Einflussfaktoren auf die Veränderungen von Hochwasser: Landnutzungsänderungen (Abholzung, Bodenverdichtung, Urbanisierung); Wasserbauliche Maßnahmen (Flussregulierungen, Hochwasserschutzdämme, Staudämme); Klimawandel (veränderter Niederschlag, Schneeschmelze und Verdunstung) (Blöschl 2022a)

angestrebt Schutzniveau beibehalten werden soll, wobei entsprechende Kosten und Raumbedarf entstehen. Aus diesem Grund ist das Verständnis der Änderungen der Hochwassergefahr ein Kernthema für die Sicherstellung des Hochwasserschutzes.

Diese Arbeit fasst in knapper Weise den aktuellen Wissensstand zu den wichtigsten Gründen der Veränderungen der Hochwasser zusammen: Landnutzungsänderungen, Wasserbauliche Maßnahmen und Klimawandel (Abb. 1). Sodann werden die Implikationen für das Hochwasserrisikomanagement diskutiert.

2 Landnutzungsänderungen

Landnutzungsänderungen beeinflussen Hochwasser in mehrerlei Hinsicht: Landwirtschaftliche Bodenverdichtung reduziert die Infiltration und verstärkt den Oberflächenabfluss. Urbanisierung verringert die Infiltration durch Flächenversiegelung, verkürzt Fließwege und erhöht Hochwasserscheitel. Abholzung verändert die Bodenstruktur und vermindert die Wasserdurchlässigkeit (Rogger et al. 2017). Auf lokaler Ebene (am Standort) sind diese Prozesse gut erforscht. Typischerweise zeigen Beregnungsexperimente, dass auf Waldböden selten Abfluss an der Oberfläche ent-

steht, während auf Grünland ein großer Teil des Regenwassers oberflächlich abfließt (Alaoui et al. 2018). Ursachen sind unter anderem Makroporen im Boden, die die Durchlässigkeit erhöhen, Rückhalt des Regenwassers in der Baumkrone, sowie eine erhöhte Verdunstung, die die Bodenfeuchte reduziert und damit die Speicherkapazität des Bodens erhöht (Rogger et al. 2017).

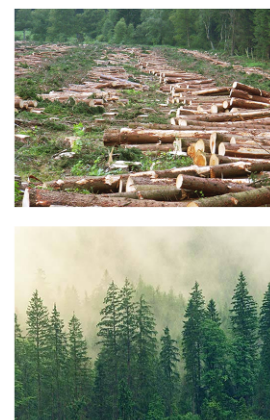
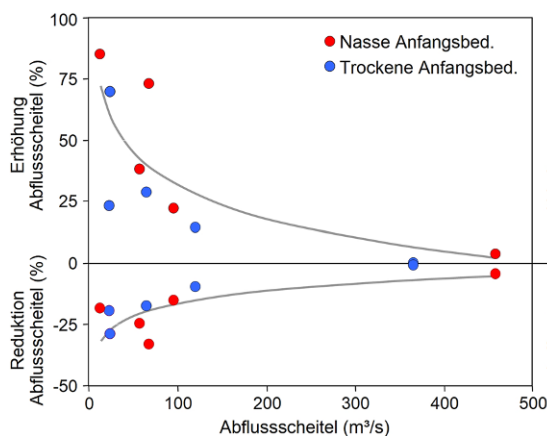


Abb. 2 Effekt der Ereignisgröße auf den Einfluss der Landnutzung auf Hochwasser: Simulierte Wirkung von Aufforstung und Abholzung auf den Hochwasserabfluss für das Kampgebiet im Waldviertel (622 km² Einzugsgebietsfläche). Jeder Punkt ist ein Ereignis. Basis: 47 % Waldfläche. Aufforstung: 86 %. Abholzung: 0 % (Restfläche ist Grünland und Ackerland) (nach Salazar et al. 2012)

Auf Einzugsgebietsebene sind die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen komplexer und schwerer messbar. Deshalb werden zur Einschätzung dieser Effekte Niederschlags-Abfluss-Modelle herangezogen. Eine Simulationsstudie für den Kamp (Abb. 2) zeigte beispielsweise, dass Abholzung den Abfluss erhöht, vor allem bei feuchtem Boden, während Aufforstung den Abfluss reduziert (Salazar et al. 2012). Dieser Effekt reduziert sich allerdings mit der Ereignisgröße. Bei großen, seltenen Ereignissen sind die Böden großteils gesättigt, wodurch sich die unterschiedlichen Bodeneigenschaften weniger stark auswirken. Der abnehmende Einfluss der Landnutzung mit der Ereignisgröße wird auch durch eine Fallstudie in Tirol verdeutlicht (Blöschl et al. 2018a). Für das Einzugsgebiet des Inn bis Oberaudorf (9700 km² Fläche) wurden Monte Carlo Simulationen des Niederschlags und des Abflusses durchgeführt. In einem Szenario wurde das gesamte Grasland unterhalb 2000m Seehöhe als aufgeforstet angesehen (11% der Gesamtfläche). Die Simulationen zeigten, dass dadurch das hundertjährige Hochwasser aber nur um 4,4% reduziert werden würde.

Auch die Einzugsgebietsfläche spielt eine entscheidende Rolle. Man könnte meinen, dass ein Einzugsgebiet wie ein Mosaik aus vielen kleinen Parzellen funktioniert – und daher unabhängig vom Maßstab in gleicher Weise auf Landnutzungsänderungen reagiert. Das ist jedoch nicht der Fall. In kleinen



Abb. 3 Effekt der Einzugsgebietsgröße auf den Einfluss der Landnutzung auf Hochwasser erklärt durch zwei Mechanismen der Abflussbildung. Links: Infiltrationsüberschuss, der Boden sättigt sich von oben nach unten. Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Regenintensität die Infiltrationskapazität übersteigt. Dies ist typischerweise in kleinen Einzugsgebieten bei kurzen, intensiven Starkregen der Fall. Rechts: Sättigungsüberschuss, der Boden sättigt sich von unten nach oben. Oberflächenabfluss entsteht bei vollständig gesättigter Bodensäule. Dies ist typischerweise in großen Einzugsgebieten bei längeren, verhältnismäßig weniger intensiven Starkregen der Fall. Die unterschiedlichen Mechanismen erklären warum Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten stärker durch Landnutzungsänderungen als in großen Gebieten beeinflusst werden (Blöschl 2022a)

Einzugsgebieten von wenigen Hektar reagiert das Gebiet wegen der kurzen Fließlängen sehr schnell auf Starkregen (Viglione und Blöschl 2009). Die größten Hochwasser werden deshalb in kleinen Einzugsgebieten durch kurze, konvektive Ereignisse hoher Intensität erzeugt. Während solcher Ereignisse ist der dominierende Abflussmechanismus der Infiltrationsüberschuss (Abb. 3a): Der Boden wird von oben her gesättigt, und wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität übersteigt, entsteht Oberflächenabfluss. Da die Infiltrationskapazität wesentlich von der Bodenbeschaffenheit abhängt, wird der erzeugte Oberflächenabfluss stark von der Landnutzung beeinflusst.

In größeren Einzugsgebieten – von einigen bis zu mehreren Tausend Quadratkilometern – ist die Situation anders. Die Reaktionszeiten sind länger (Gaál et al. 2012), und deshalb sind eher länger andauernde, vergleichsweise weniger intensive Regenfälle entscheidend. Bei solchen Niederschlägen

dominiert der Abflussmechanismus des Sättigungsüberschusses (Abb. 3b): Der Boden wird von unten her gesättigt, da die geringe Regenintensität anfangs vollständig infiltrieren kann. Die Sättigungsfront steigt dabei von einer tieferen, undurchlässigen Schicht nach oben. Oberflächenabfluss entsteht, sobald der Grundwasserspiegel die Oberfläche erreicht. Da die Tiefe bis zur undurchlässigen Schicht meist nicht von der Landnutzung abhängt, wird der Oberflächenabfluss kaum durch sie beeinflusst. In großen Einzugsgebieten ist der Hochwasserabfluss daher weniger empfindlich gegenüber Landnutzungsänderungen.

3 Wasserbauliche Maßnahmen

Der Einfluss wasserbaulicher Maßnahmen auf Hochwasser lässt sich generell gut bestimmen. In manchen Fällen sind komplexe hydrodynamische Modelle (wie etwa im HORA-Projekt eingesetzt, Blöschl et al. 2022a) erforderlich, wäh-

rend in anderen Fällen eine einfache Massenbilanz eine gute Abschätzung der Fähigkeit des Hochwasserrückhaltes liefert. Die bestimmende Größe ist das verfügbare Speichervolumen (z. B. im Vorland oder in einem Rückhaltebecken) im Vergleich zum Volumen der Hochwasserspitze. Demzufolge sind Hochwasserrückhaltebecken in kleinen Einzugsgebieten bei kurzen Ereignissen mit geringen Volumen besonders effektiv.

Auch die Größe des Ereignisses spielt deshalb eine zentrale Rolle. Rückhaltebecken werden meist so geplant, dass sie möglichst spät dotiert werden um ihre Kapazität maximal auszunutzen und die Hochwasserspitze zu kappen. Dementsprechend werden kleine Hochwasser, die keine Gefahr darstellen, durchgelassen. Hochwasser, die größer als die Planungswerte sind, füllen das Rückhaltevolumen früh im Ereignis, sodass zum Zeitpunkt des Scheitels kein Speicherraum mehr zur Verfügung steht, und dadurch verlieren sie ihre Wirkung. Die größte Rückhaltewirkung zeigt sich deshalb bei mittleren Hochwassern (typischerweise entsprechend der Bemessung bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren) (Abb. 4). Die Schutzwirkung ist unmittelbar unterhalb der Anlage am größten und nimmt flussabwärts meist rasch ab (Volpi et al. 2018).

Neben dem Volumen ist auch die Regelung der Rückhalteräume entscheidend für deren Wirksamkeit. Das Becken muss rechtzeitig und koordiniert gefüllt und wieder entleert werden, damit es beim Eintreffen der Hochwasserspitze mit maximaler Kapazität zur Verfügung steht. Daraus ergibt sich die absolute Notwendigkeit präziser hydrologischer Vorhersagen. Eine fehlerhafte Vorhersage kann zu kritischen Situationen führen: Ist das Becken bereits voll, wenn der größte Abfluss eintrifft, kann es nicht mehr zur Risikominderung beitragen. Im Gegenteil, es wird zu einem Schwachpunkt des Systems.

Flussbegradigungen wurden in Europa vor allem im 19. und frühen 20. Jahrhundert zur Erhöhung der Abflusskapazitäten und Verminderung der Überflutungshäufigkeit durchgeführt. Bei der Betrachtung ihres Einflusses auf Hochwasser muss zwischen den lokalen und den flussabwärts gelegenen Abschnitten unterschieden werden: Lokal führt die größere Kapazität zu selteneren Überflutungen, hat aber kaum Einfluss auf den Scheitelabfluss (Wy-

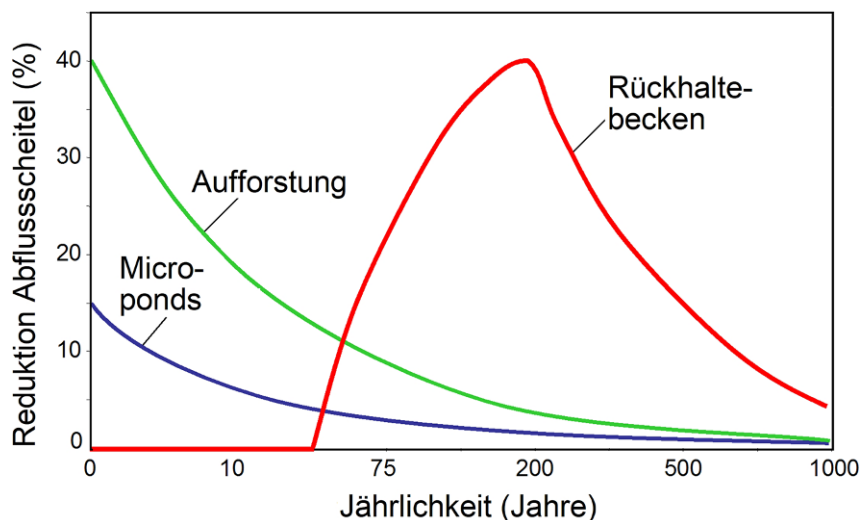


Abb. 4 Effekt der Ereignisgröße auf den Einfluss von Rückhaltebecken, Microponds und Aufforstung auf Hochwasser (schematisch). Rückhaltebecken haben bei kleinen Hochwassern meist wenig Einfluss, da diese durchgelassen werden, bei extremen Hochwassern ebenso wenig Einfluss, da die Becken früh gefüllt sind. Der größte Effekt tritt bei mittleren Hochwassern auf. Microponds, d. h. kleine in der Landschaft verteilte Becken ohne Regelung sind bei kleinen Ereignissen am wirksamsten, ebenso die Aufforstung (Salazar et al. 2012)

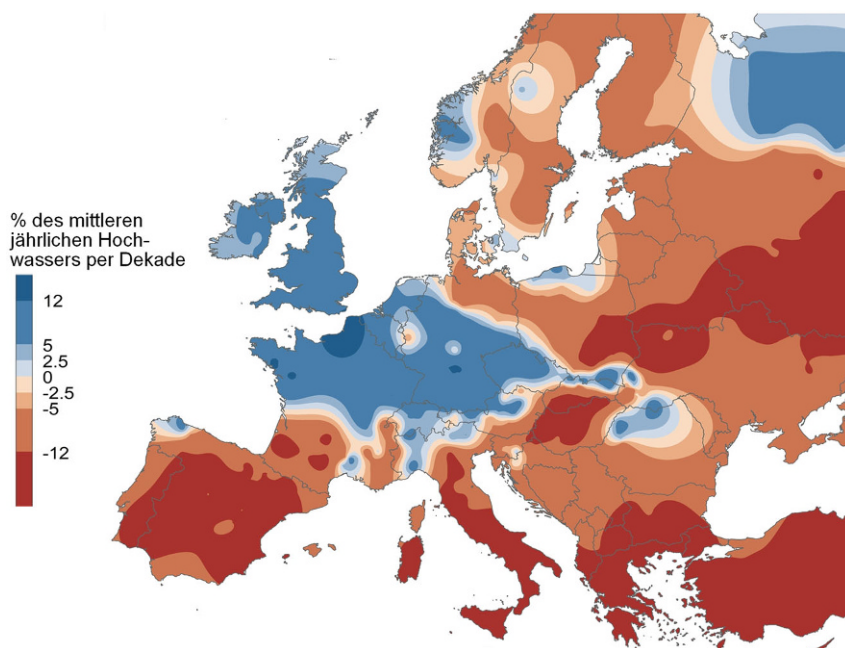


Abb. 5 Hochwassertrends 1960–2010 ermittelt aus Abflussmessungen. Blaue Farben zeigen steigende, rötliche Farben fallende Trends im Median des Scheitelabflusses. Nur Stationen mit signifikanten Trends (Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$; 664 Stationen) wurden in die räumliche Interpolation einbezogen. Die Auswertung ist für Einzugsgebietsflächen von mehreren zehn bis zehntausenden Quadratkilometern repräsentativ (Blöschl et al. 2019)

zga 1996). Flussabwärts kann jedoch der Hochwasserscheitel steigen, wenn Rückhalteraum im Vorland verloren geht. Ähnlich wie bei Rückhaltebecken hängt der negative Effekt davon ab, wie viel Speichervolumen durch die Maßnahmen verloren geht, und nicht so sehr von anderen Faktoren wie z. B. der Vegetation (Blöschl et al. 2015a). Auch die Ereignisgröße hat einen Einfluss. Für eine Fallstudie an der Bayerischen Donau wurde gezeigt, dass der negative Einfluss mit der Ereignisgröße abnimmt, da in der Situation vor der Regulierung zum Zeitpunkt des Scheitels das Vorland bereits weitgehend mit Wasser gefüllt ist (Skublics et al. 2016).

4 Klimawandel

In den letzten hundert Jahren ist die globale Durchschnittstemperatur um etwa $1,3^\circ\text{C}$ gestiegen, mit beobachtbaren Auswirkungen auf den weltweiten Wasserkreislauf. In Europa beträgt die Erwärmung sogar mehr als 2°C . Prognosen für das 21. Jahrhundert (Merz et al. 2021) sagen vorher, dass der 100-jährliche Hochwasserscheitel in vielen Regionen (z. B. Subsahara-Afrika, Ost- und Südostasien, Nordwesteuropa, Nordrussland, in Teilen Süd- und Nordamerikas) zunehmen dürfte. Rückgänge werden hingegen für Osteuropa, Südwestrussland und Nordafrika erwartet. Die Verlässlichkeit solcher Vorhersagen hängt nicht nur von den Klimaprognosen ab, sondern auch davon, wie gut die hochwassererzeugenden Prozesse in Atmosphäre, Boden und Untergrund verstanden und modelliert werden (Blöschl 2022b).

Für die letzten sechs Jahrzehnte liegen detaillierte Hochwasserdaten für Europa vor (Abb. 5). Sie zeigen Trends mit steigenden mittleren Hochwasserscheitel in Nordwesteuropa (signifikante Stationen mit über 5% Zunahme pro Jahrzehnt) und Rückgängen in Süd- und Osteuropa. Die Veränderungen verlaufen nicht linear über den Zeitraum, sondern zeigen sich besonders stark im Jahrzehnt 1980–1990 (Blöschl et al. 2023). Während Abb. 5 die Veränderungen der mittleren jährlichen Hochwasser darstellt, sind für das Hochwassermanagement größere Ereignisse relevanter. Die Untersuchung von Bertola et al. (2020) wies nach, dass sich auch die 100-jährlichen Hochwasser ähnlich verhalten mit gewissen Unterschieden. In kleinen Einzugsgebieten Nordwesteuropas nehmen sie

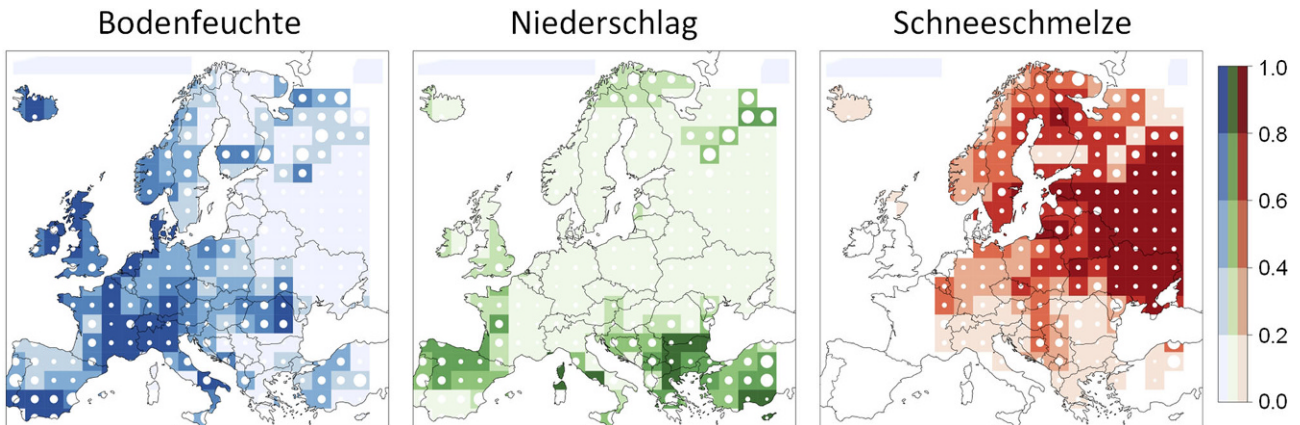


Abb. 6 Beitrag zu den Veränderungen des 100-jährlichen Hochwassers basierend auf Abflussmessungen (1960–2010) durch Niederschlag, Bodenfeuchte und Schneeschmelze in Europa. Farbintensität zeigt den relativen Beitrag (z. B. bedeutet 0,5 einen Beitrag von 50 %). Weiße Kreise zeigen die Zuverlässigkeit der Berechnung, kleine Kreise sind zuverlässiger (Bertola et al. 2021)

stärker zu als die mittleren Hochwasser, in Südeuropa nehmen sie weniger stark ab, und in Osteuropa ist ihr Rückgang ähnlich dem der mittleren Hochwasser.

Eine kürzlich erschienene Auswertung für Österreich zeigt, dass vor allem im südlichen Niederösterreich und in der Obersteiermark sowie in Gebieten entlang des Alpenhauptkamms eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser von teils über +20% (+5% pro Dekade) zu verzeichnen ist (Laaha et al. 2025). Der Anstieg ist in kleineren Einzugsgebieten ausgeprägter als in größeren. Allerdings bedeutet dies nicht notwendigerweise, dass sich die Hochwasser mit kleinen Wahrscheinlichkeiten (hohen Jährlichkeiten) im selben Maße ändern, da dies von der genauen Änderung der statistischen Verteilung abhängt.

Die Prozessursachen der Veränderungen sind in Abb. 6 abgebildet. In Nordwesteuropa ist der zunehmende Starkregen der Hauptgrund für die steigenden Hochwasser, während Bodenfeuchte nur eine untergeordnete Rolle spielt. In Südeuropa ist die abnehmende Bodenfeuchte infolge stärkerer Verdunstung bestimmend für die geringeren Hochwasserabflüsse, während der Niederschlag weniger entscheidend ist. In Osteuropa haben steigende Temperaturen zu weniger mächtigen Schneedecken geführt, wodurch die Schneeschmelzhochwasser kleiner wurden (Kemter et al. 2020). Diese Zusammenfassung ist stark generalisiert, da Hochwasser im gleichen Gebiet durch verschiedene Prozesse verursacht werden können, etwa Dauerregen in Kombination mit hoher Bodenfeuchte, kurzzeitige Extremnieder-

schläge, Schneeschmelze oder Regen auf Schnee.

Während sich Abb. 5 und 6 auf mittlere und große Flüsse beziehen, sind auch Hochwasser an kleinen Bächen (die ein kleines Einzugsgebiet entwässern) von großem Interesse. In kleinen Gebieten sind oft kleinräumige, kurze, intensive Ereignisse konvektiven Ursprungs (d.h. Gewitter) maßgebend. Für solche Ereignisse geht man davon aus, dass die Extremniederschlä-

ge mit der Lufttemperatur zunehmen, und zwar in der Regel um ca. 7%/K, entsprechend der Clausius-Clapeyron-Rate (Fowler et al. 2021). Bisher fehlten allerdings empirische Nachweise für diesen Effekt. Eine aktuelle österreichische Studie (Haslinger et al. 2025), lieferte erstmals den Nachweis und stellte die Verbindung zu den Hochwassern her (Abb. 7). Dabei haben stündliche und tägliche Niederschläge ein grundsätzlich anderes Verhalten.

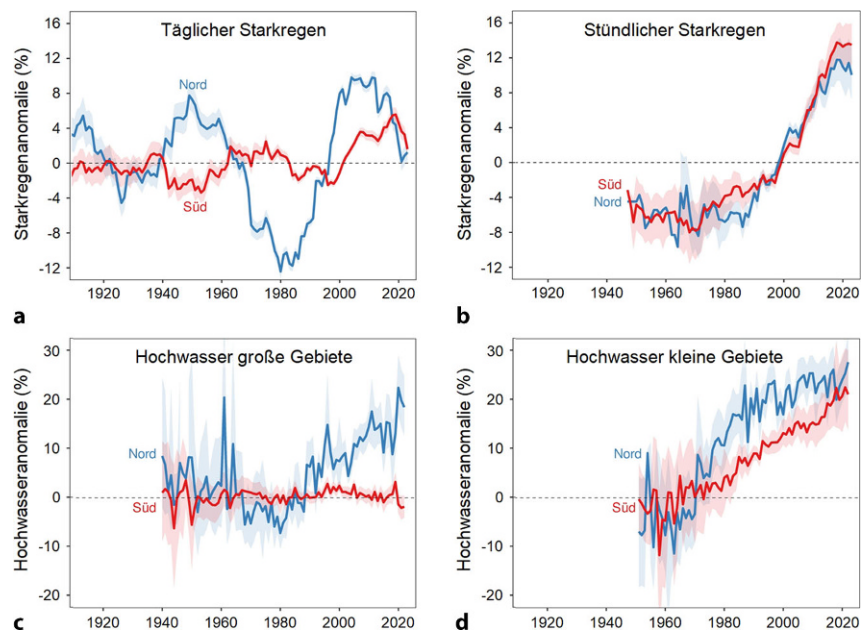


Abb. 7 a, b Entwicklung der täglichen und stündlichen Extremniederschläge (99 Perzentile) in Österreich nördlich (blau) und südlich (rot) des Alpenhauptkamms. c, d Entwicklung der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse in großen (> 500 km²) und kleinen (< 50 km²) Einzugsgebieten. Alle Werte sind Messungen im Sommerhalbjahr (Haslinger et al. 2025)

Die Veränderungen stündlicher Starkniederschläge sind im Einklang mit dem Temperaturanstieg, entsprechend der Clausius-Clapeyron-Rate (Haslinger et al. 2025). Die Veränderungen der täglichen Starkniederschläge hingegen korrelieren kaum mit der Lufttemperatur, sondern sind eng mit Indizes der atmosphärischen Zirkulation verknüpft. Dies deutet auf eine größere Bedeutung der globalen atmosphärischen Strömungen als bisher angenommen hin.

Haslinger et al. (2025) zeigten auch, dass die Änderungen der täglichen Starkniederschläge gut mit den gemessenen Hochwassern in den großen Einzugsgebieten Österreichs übereinstimmen. Die Änderungen der stündlichen Starkniederschläge sind hingegen fast deckungsgleich mit den Zunahmen der Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten (Abb. 7) und betragen jeweils ca. 25 % in den letzten vier Jahrzehnten, gemittelt über Österreich.

Der Zusammenhang zwischen den Veränderungen der Starkniederschläge und der Hochwasser ist für eine Einschätzung der zukünftigen Situation besonders wichtig. Bei großen Hochwassern, wenn sich der Boden der Sättigung nähert, steigt der Scheitelabfluss um etwa 1 %, bei einer Zunahme des Niederschlags um 1 %. Dieses Verhältnis wird als Elastizität (in diesem Fall von 1 %/%) bezeichnet. Bei kleineren Ereignissen, und in klimatisch trockeneren Regionen, wo die Sättigung des Bodens weniger wahrscheinlich ist, kann die Elastizität über 1 %/ % liegen; wenn Schneeschmelze ein wichtiger Prozess ist, auch darunter (Bertola et al. 2021; Breinl et al. 2021; Cafiero et al. 2025).

5 Implikationen für das Hochwasserrisikomanagement

Werden die Hochwasser größer? Das hängt davon ab, welche der diskutierten Faktoren maßgebend sind, sowie von der Ereignisstärke, der Größe des jeweiligen Einzugsgebiets und weiteren lokalen Bedingungen. Grundsätzlich können in kleinen Einzugsgebieten Urbanisierung und Bodenverdichtung zu einer deutlich erhöhten Hochwassergefahr führen, während dieser Effekt mit der Einzugsgebietsfläche abnimmt. Aus den damit verbundenen Prozessüberlegungen ergibt sich, dass in kleinen ländlichen Einzugsgebieten in Klimaregionen wie Österreich eine Erhöhung des Waldanteils auf Kosten von Grün-

land das Potential hat, kleine Hochwasser zu reduzieren. Bei großen Hochwassern geht die Wirkung stark zurück. Für mittlere bis große Einzugsgebiete ist die Wirksamkeit generell gering. Während eine Erhöhung des Waldanteils aus anderen Gründen sinnvoll sein kann (Schutz vor Bodenerosion, Lawinen, Muren, Steinschlag, Klimaschutz), ist Aufforstung keine wirksame Maßnahme des Hochwasserschutzes für mittlere bis große Einzugsgebiete. Für kleine städtische Einzugsgebiete ist die lokale Infiltration von Regenwasser in mehrfacher Hinsicht positiv: Sie trägt nicht nur zur Reduktion von Hochwasser bei, sondern verbessert auch die Grundwasserneubildung und wirkt einem Absinken des Grundwasserspiegels entgegen.

Hochwasserschutzdämme und Flussregulierungen tendieren dazu, wegen des Verlustes von Rückhalteraum den Hochwasserabfluss stromabwärts zu erhöhen. Aus diesem Grund werden heute Schutzdämme in der Regel nur noch in Verbindung mit Rückhaltebecken errichtet. Dies ist im Wasserrechtsgesetz verankert, das eine Verschlechterung (sprich Verschärfung) für den Unterlieger im Sinne des „Verschlechterungsverbot“ verbietet. Daher sind auch bei Hochwasserschutzmaßnahmen stets Ausgleichsmaßnahmen vorgesehen, um den Effekt der Verschlechterung für den Unterlieger zu verhindern. Umgekehrt können Renaturierungsmaßnahmen – etwa das Entfernen bzw. Zurückverlegen von Hochwasserschutzdämme oder das Aufweiten des Flusslaufs den Wasserspiegel stromabwärts senken. Diese Maßnahmen sind meist bei mittleren Hochwassern besonders wirksam, da – je nach Situation – bei großen Hochwassern der Speicherraum frühzeitig gefüllt sein kann und zum Zeitpunkt des Hochwasserscheitels möglicherweise wenig Volumen verfügbar ist (Skublics et al. 2016). Zur Bewertung der Wirksamkeit solcher Maßnahmen ist das tatsächlich nutzbare Rückhaltvolumen im Vergleich zum Volumen der Hochwasserwelle zu betrachten.

Der Einfluss des Klimawandels zeigt sich bei allen Ereignisstärken und allen Gebietsgrößen, wobei in den kleinen Gebieten eine deutlich stärkere Zunahme zu verzeichnen ist, die mit zunehmenden Starkniederschlägen kurzer Dauer zu erklären ist. Aufgrund des engen Zusammenhangs mit der verfügbaren Energie ist bei einem weiter schreitenden Klimawandel mit weiteren

Zunahmen zu rechnen. Die Auswertungen in Abb. 7 beziehen sich auf den Mittelwert Österreichs nördlich bzw. südlich des Alpenhauptkammes. Für praktische Anwendungen ist auch eine regional differenzierte Betrachtung von Interesse, die im Projekt KLIWAS (Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft) derzeit im Detail untersucht wird. Von den Ergebnissen wird in Zukunft berichtet.

Für die Bestimmung des Bemessungshochwassers ist der Einfluss des Klimawandels natürlich von höchster Relevanz. Die derzeit verwendeten Werte in Österreich und anderen Ländern berücksichtigen bereits implizit den Klimaeinfluss durch die Verwendung einer entsprechend umfangreichen Datenbasis. Dabei basiert die Ermittlung des Bemessungshochwassers nicht nur auf rein statistischen Methoden, sondern auf der sogenannten Hochwasserhydrologie, d.h. der Kombination der statistischen Analyse gemessener Abflussreihen, mit regionalen, historischen und prozessbasierten Auswertungen (u.a. Niederschlag-Abflussmodellierung) (Blöschl und Merz 2008). Die Vorgehensweise ist in entsprechenden Regelwerken verankert (z.B. ÖWAV 2019; DWA 2012; BMLUK 2024).

In manchen Ländern werden in der letzten Zeit Modellketten bestehend aus Klimamodellen und Niederschlag-Abflussmodellen für diesen Zweck herangezogen. Dieser Ansatz ist zwar intuitiv, aber mit großen Unsicherheiten verbunden, da er in der Regel nur teilweise an Abflussmessungen validiert ist (Blöschl 2022a). Eine Alternative sind phänomenologische Modelle (Blöschl 2018b; Cafiero et al. 2025), die einfacher, transparenter und datenbasierter sind, aber mehr hydrologisches Fachwissen erfordern. In eine ähnliche Kategorie fällt der oben erwähnte Elastizitätsansatz (Breinl et al. 2021; Cafiero et al. 2025). Eine weitere Möglichkeit sind possibilistische Ansätze, d.h. Methoden die auf Wenn-Dann Szenarien basieren. Auch diese benötigen vertiefte hydrologische Kenntnisse, und besitzen den Vorteil, dass damit auch unbekanntere Situationen abgedeckt werden können, wie z.B. unübliche Entstehungsmechanismen eines Hochwassers, oder Hochwasser die zufolge unerwarteter Prozesse viel größer sind als erwartet.

Die Möglichkeit von Hochwassern, die deutlich größer ausfallen als erwar-

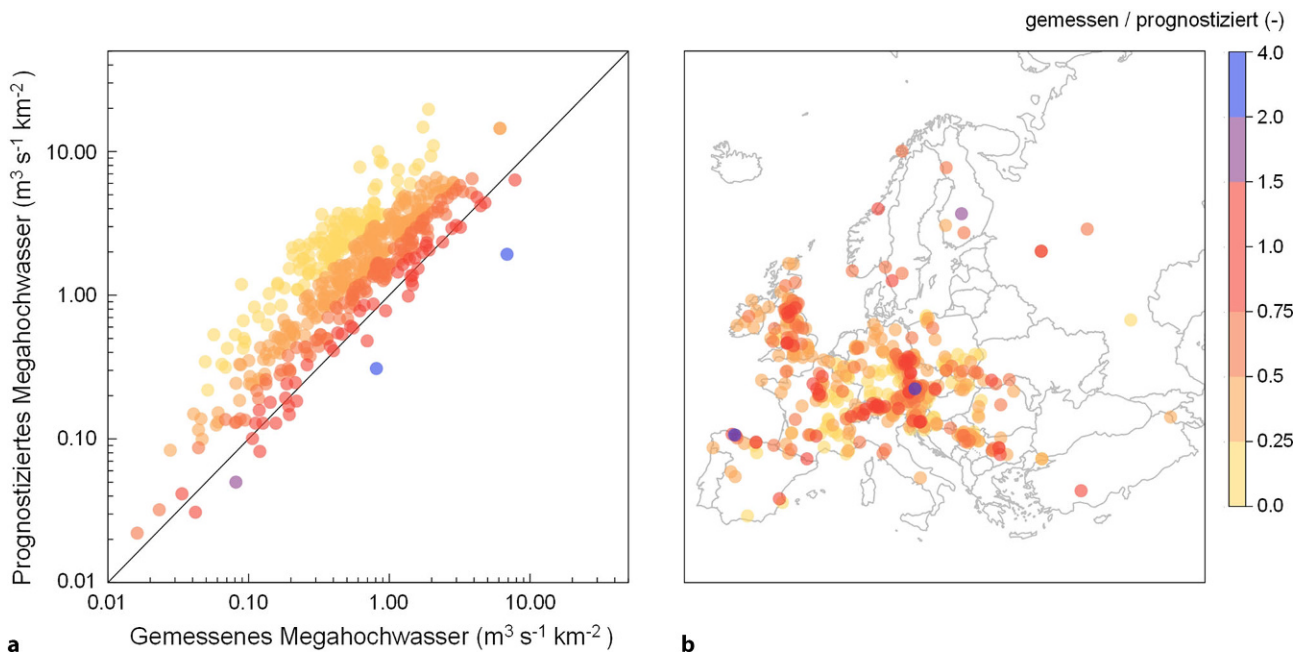


Abb. 8 **a** Prognostizierte Abflussspende für 498 Ziel-Einzugsgebiete im Vergleich zur gemessenen Abflussspende der Megahochwasser in denselben Gebieten. Die prognostizierten Werte wurden anhand der Hüllkurven von Abflussdaten aus einer Gruppe von Spender-Einzugsgebieten bis zum Jahr vor dem jeweiligen Megahochwasser geschätzt. Die Farben zeigen das Verhältnis zwischen gemessenem und prognostiziertem Abfluss. **b** Lage der Ziel-Einzugsgebiete. Megahochwasser treten in ganz Europa auf und sind – regional betrachtet – weniger überraschend, als oft angenommen (Bertola et al. 2023)

tet (sogenannte „Megahochwasser“), wird mitunter als ein „Schwert des Damokles“ bezeichnet (Montanari et al. 2024). Sie beschreibt eine Gefahr, die den Betroffenen nicht immer bewusst ist – in Anlehnung an die Erzählung von Damokles am Hofe des Dionysios von Syrakus. Eine Abschätzung der Größenordnung solcher Megahochwasser kann durch einen Vergleich mit Messungen von Extremereignissen in anderen, hydrologisch ähnlichen, Regionen erfolgen. Eine Analyse von 8000 Pegeln in Europa durch Bertola et al. (2023) zeigte, dass fast alle (95%) der beobachteten Megahochwasser innerhalb der zuvor in anderen Regionen gemessenen Werte lagen (Abb. 8). Viele lokale Überraschungen wären demnach auf kontinentaler Ebene vorhersehbar gewesen. Auch wenn man länger in die Geschichte zurückgeht (Blöschl et al. 2020), sind jüngste, scheinbar überraschende Ereignisse nicht mehr so überraschend. Rekonstruktionen historischer Hochwasser im Ahrtal beispielsweise zeigten, dass in den Jahren 1910 und 1804 bereits ähnliche Hochwasser wie im Juli 2021 aufgetreten sind (Vorogushyn et al. 2022; Montanari et al. 2024).

Bei den Planungsprozessen werden Megaereignisse allerdings in der Re-

gel nicht berücksichtigt. Die Gründe dafür sind nicht nur wirtschaftlicher Natur, sie hängen auch mit anderen Faktoren zusammen (Montanari et al. 2024). Dazu zählen die Nichtlinearität hydrologischer Prozesse und der Klimawandel; psychologische Gründe wie die menschliche Neigung, das Außergewöhnliche zu unterschätzen; sowie sozioökonomische bzw. politische Gründe wie die Bevorzugung kostengünstigerer und kurzfristig besser begründbarer Lösungen.

Zu betonen ist, dass niemals ein absolutes Schutzniveau erreicht werden kann. Wenn Bürgerinnen und Bürger für die folgenden 30 Jahre eine 99%ige Wahrscheinlichkeit wünschen, nicht mehr von einem Hochwasser betroffen zu sein, wäre ein Hochwasserschutz erforderlich, der auf ein 3000 jährliches Hochwasser ausgelegt ist, ein Ziel das schwer umsetzbar ist. Das Bewusstsein für diese Grenzen des Schutzes ist daher ein wichtiger Aspekt in der Hochwasserplanung.

Die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung des Hochwasserrisikos in spezifischen lokalen Fällen sollte durch eine quantitative Bewertung überprüft werden. Dabei ist die Risikofunktion definiert als das Produkt der Wahrscheinlichkeit des Eintretens

des Hochwassers (Gefährdung) mit Exposition und Vulnerabilität. Exposition beschreibt, was und wie viel überhaupt potenziell betroffen sein kann – also die „bloße Anwesenheit“ von Werten im Gefahrenbereich. Vulnerabilität beschreibt, wie stark die betroffenen Werte geschädigt werden, wenn es tatsächlich zu einem Hochwasserereignis kommt. Das Ziel ist die Vulnerabilität und die Exposition gegenüber Ereignissen mit großer Jährlichkeit (d.h. geringer Eintrittswahrscheinlichkeit) zu reduzieren. Abb. 9 veranschaulicht dieses Konzept, indem sie die Auswirkungen zweier Arten von Maßnahmen auf Vulnerabilität und Exposition in Abhängigkeit von der Jährlichkeit des Hochwassers gegenüberstellt. Schutzdämme und Rückhaltebecken reduzieren die Vulnerabilität bei kleinen Ereignissen, können aber bei Extremereignissen unwirksam sein oder sogar das Risiko erhöhen. Zudem kann die Exposition erhöht werden, wenn der vermeintlich geschützte Raum besiedelt wird und dadurch die gefährdeten Werte steigen (der sogenannte Levee Effekt). Abb. 9 rechts zeigt ein Beispiel für effektive raumplanerische Maßnahmen, die durch eine Verminderung der gefährdeten Werte auch bei Extremereignissen die Exposition und damit das

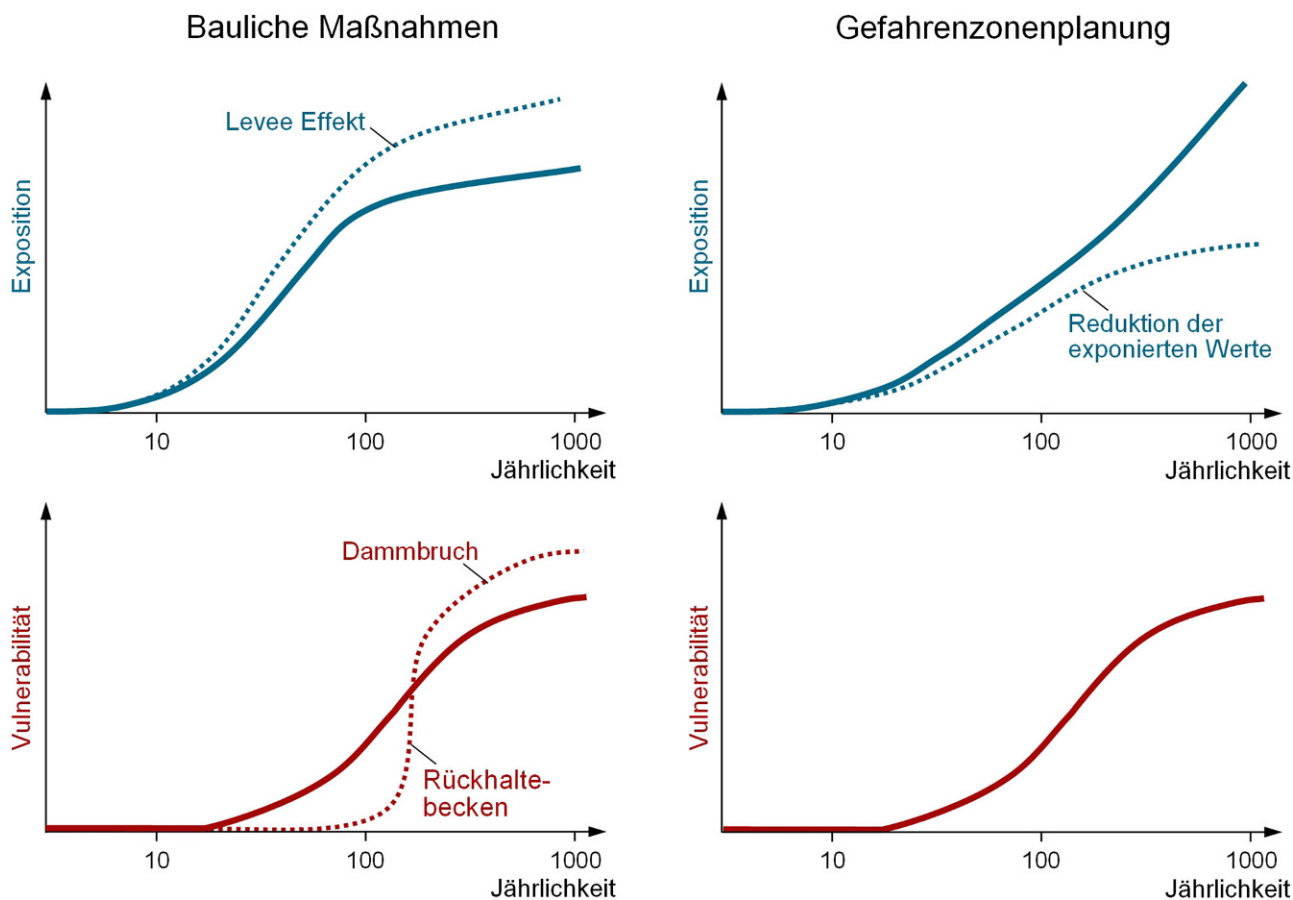


Abb. 9 Beispiel für Exposition und Vulnerabilität in Abhängigkeit von der Jährlichkeit. Links: Situation bei baulichen Schutzmaßnahmen. Rechts: Situation bei raumplanerischen Maßnahmen der Gefahrenzonenplanung. Die Reduktion der Exposition ist eine robuste Strategie zur Senkung des Risikos über ein breites Spektrum an Hochwasserabflüssen hinweg (Montanari et al. 2024)

Hochwasserrisiko reduzieren. Noch höhere Dämme und noch größerer Rückhaltebecken sind daher keine „robuste“ Lösung (im Sinne von widerstandsfähig gegenüber Systemänderungen). Deshalb müssen mittel- und langfristig andere Maßnahmen (passiver Hochwasserschutz, Eigenvorsorge, etc.) stärker in das gesamte Risikomanagement integriert werden, die in jeder Hinsicht wirksam sind.

Ereignisse, wie das im Juli 2021 im Ahrtal oder im Oktober 2024 in Valencia, verdeutlichen, dass das Ausklammern extremer Szenarien gravierende Folgen haben kann. Ein wirksamer Umgang mit dem Hochwasserrisiko erfordert deshalb nicht nur ein Bündel verschiedener baulicher und nicht baulicher Maßnahmen – von der Vorsorge bis zur Nachsorge, sondern auch Überlegungen für Extremszenarien die weit über das 100 jährliche Hochwasser hinausgehen. Die EU Hochwasser-Richtlinie (EU 2007) sieht zwar eine Befassung auch mit einem „seltenen

Ereignis“ (das wurde in Österreich mit einem 300-jährlichen Ereignis festgelegt) im Rahmen des Hochwassermanagementplans vor; ein gesellschaftliche Diskurs zu noch größeren Ereignissen erscheint angesichts der in dieser Arbeit beschriebenen Änderungen und der jüngsten großen Ereignisse, sinnvoll. Insbesondere geht es um die Frage des Überlastfalls, also um die Auslegung von Infrastruktur für extrem seltene Hochwasser, sowie flankierende Maßnahmen wie Frühwarnsysteme, Notfallpläne, objektspezifischer Schutz und die Sensibilisierung der Bevölkerung. Der Schutz von Menschenleben muss dabei oberste Priorität haben. Da es sich um ein überaus sensibles Thema handelt, muss die Diskussion differenziert, evidenzbasiert und mit Takt geführt werden. Aktuelle Initiativen in Österreich, wie das jüngst vom BMLUK gestartete „Aktionsprogramm Zukunft Hochwasserschutz 2024+“ sowie eine breit angelegte Kampagne zur Stärkung der Eigenvorsorge („Hochwasser – Ich

schütze mich!“), sind ein Schritt in die richtige Richtung.

Danksagung Die Untersuchungen wurden gefördert durch den Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF) unter Projektnummer I3174 und I4776 und im Rahmen des Doktoratskollegs Wasserwirtschaftliche Systeme (W1219) und durch den Europäischen Forschungsrat (ERC) im Rahmen des Advanced Grant Floodchange (Projekt 291152). Dr. Korbinian Breinl und Dr. Heinz Stiefelmeyer wird für die Durchsicht der Arbeit herzlich gedankt.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ur-

sprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der

genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist

für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- Alaoui A, Rogger M, Peth S, Blöschl G (2018):** Does soil compaction increase floods? A review. *J Hydrol* 557:631–642
- Bertola M, Viglione A, Lun D, Hall J, Blöschl G (2020):** Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different? *Hydrol Earth Syst Sci* 24:1805–1822
- Bertola M, Viglione A, Vorogushyn S, Lun D, Merz B, Blöschl G (2021):** Do small and large floods have the same drivers of change? A regional attribution analysis in Europe. *Hydrol Earth Syst Sci* 25:1347–1364
- Bertola M, Blöschl G, Bohac M, Borga M, Castellarin A, Chirico GB, Živković N (2023):** Megafloods in Europe can be anticipated from observations in hydrologically similar catchments. *Nat Geosci* 16:982–988
- Blöschl G (2022a):** Three hypotheses on changing river flood hazards, *Hydrology and Earth System Sciences*, 26. pp. 5015–5033. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>.
- Blöschl G (2022b):** Flood generation: process patterns from the raindrop to the ocean. *Hydrol Earth Syst Sci* 26:2469–2480. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2469-2022>
- Blöschl G, Merz R (2008):** Bestimmung von Bemessungshochwassern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft* 98(11):12–18
- Blöschl G, Gaál L, Hall J, Kiss A, Komma J, Nester T, Parajka J, Perdigo RAP, Plavcová L, Rogger M, Salinas JL, Viglione A (2015a):** Increasing river floods: fiction or reality? *Wiley Interdiscip Rev Water* 2:329–344
- Blöschl G, Horváth Z, Kiss A, Komma J, Nester T, Perdigo RAP, Viglione A, Waser J (2015b):** Neue Methoden für das Hochwasserrisikomanagement. *Österr Ingenieur- Architekt-Zeitschr (ÖIAZ)* 160:15–27
- Blöschl G, Blaschke AP, Haslinger K, Hofstätter M, Parajka J, Salinas J, Schöner W (2018a):** Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70:462–473
- Blöschl G, Komma J, Nester T, Rogger M, Salinas JL, Viglione A (2018a):** Die Wirkung des Waldes auf Hochwasser. *Wildbach- und Lawinenverband* 88(181):288–296
- Blöschl G, Hall J, Parajka J, Perdigo RAP, Merz B, Arheimer B, Aronica GT, Bilibashi A, Boháč M, Bonacci O, Borga M, Čanjevac I, Castellarin A, Chirico GB, Claps P, Fiala K, Frolova N, Gorbachova L, Gül A, Hannaford J, Harigan S, Kireeva M, Kiss A, Kjeldsen TR, Kohnová S, Koskela JJ, Ledvinka O, Macdonald N, Mavrou-Guirguinova M, Mediero L, Merz R, Molnar P, Montanari A, Murphy C, Osuch V, Ovecharuk V, Radevski I, Rogger M, Salinas JL, Sauquet E, Šraj M, Szolgay J, Viglione A, Volpi E, Wilson D, Zaimi K, Živković N (2019):** Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573:108–111
- Blöschl G, Kiss A, Viglione A, Barriendos M, Böhm O, Brázdil R, Coeur D, Demarée G, Llasat MC, Macdonald N, Retsö D, Roald L, Schmocker-Fackel P, Amorim I, Belinová M, Benito G, Bertolin C, Camuffo D, Cornel D, Doctor R, Elleder L, Enzi S, Garcia JC, Glaser R, Hall J, Haslinger K, Hofstätter M, Komma J, Li-manówka D, Lun D, Panin A, Parajka J, Petric H, Rodrigo FS, Rohr C, Schönbein J, Schulte L, Silva LP, Toonen W, Valent P, Waser J, Wetter O (2020):** Current flood-rich period is exceptional compared to the past 500 years in Europe. *Nature* 583:560–566
- Blöschl G, Waser J, Buttinger-Kreuzhuber A, Cornel D, Eisl J, Hofer M, Hollaus M, Horváth Z, Komma J, Konev A, Parajka J, Pfeifer N, Reithofer A, Salinas J, Valent P, Viglione A, Wimmer M, Stiefelmeyer H (2022):** HochwasserRisikozonierung Austria 3.0 (HORA 3.0). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00848-7>
- Blöschl G, Bertola M, Lun D, Viglione A, Kiss A, Komma J (2023):** Langfristige Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Europa. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 67(6):289–300. https://doi.org/10.5675/HyWa_2023.5_6
- BMLUK (2024)** Leitfaden der Staubeckenkommission zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien.
- Breinl K, Lun D, Müller-Thomy H, Blöschl G (2021):** Understanding the relationship between rainfall and flood probabilities through combined intensity-duration-frequency analysis. *J Hydrol* 602:126759
- Cafiero L, Bertola M, Mazzoglio P, Laio F, Blöschl G, Viglione A (2025):** How changes in future precipitation impact flood frequencies: a quantile-quantile mapping approach. *Water Resour Res* (im Druck)
- Doocy S, Daniels A, Murray S, Kirsch TD (2013):** The human impact of floods: a historical review of events 1980–2009 and systematic review. *PLOS Curr*. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98e8171a>
- DWA (2012):** Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 552. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef
- EU (2007):** Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 288/27
- Fowler HJ, Lenderink G, Prein AF, Westra S, Allan RP, Ban N, Barbero R, Berg P, Blenkinsop S, Do HX, Guerreiro S, Haerter JO, Kendon EJ, Lewis E, Schär C, Sharma A, Villarini G, Wasko C, Zhang X (2021):** Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ* 2:107–122. <https://www.nature.com/articles/s43017-020-00128-6>
- Gaál L, Szolgay J, Kohnová S, Parajka J, Merz R, Viglione A, Blöschl G (2012):** Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resour Res* 48:W04511. <https://doi.org/10.1029/2011WR011509>
- Haslinger K, Breinl K, Pavlin L, Pistotnik G, Bertola M, Olefs M, Greiling M, Schöner W, Blöschl G (2025):** Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. *Nature* (im Druck). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2>
- Kemter M, Merz B, Marwan N, Vorogushyn S, Blöschl G (2020):** Joint trends in flood magnitudes and spatial extents across Europe. *Geophys Res Lett* 47:e2020GL087464. <https://doi.org/10.1029/2020GL087464>
- Laaha G, Laimighofer J, Parajka J, Bertola M, Blöschl G (2025):** Abflusstrends in Österreichs Fließgewässern 1977–2020. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 77:338–346. <https://doi.org/10.1007/s00506-024-01106-8>
- Merz B, Blöschl G, Vorogushyn S, Dottori F, Aerts JC, Bates P, Bertola M, Kemter M, Kreibich H, Lall U, Macdonald E (2021):** Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nat Rev Earth Environ* 2:592–609
- Montanari A, Merz B, Blöschl G (2024):** HESS Opinions: The sword of Damocles of the impossible flood. *Hydrol Earth Syst Sci* (im Druck)
- ÖWAV (2019):** Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Regelblatt 220 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)
- ÖWAV (2025):** Hochwasserschutz. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Online veröffentlicht am 14. Juli 2024
- Rogger M, Agnoletti M, Alaoui A, Bathurst JC, Bodner G, Borga M, Chaplot V, Gallart F, Glatzel G, Hall J, Holden J, Holko L, Horn R, Kiss A, Kohnová S, Leitinger G, Lennartz B, Parajka J, Perdigo RAP, Peth S, Plavcová L, Quinton JN, Robinson M, Salinas JL, Santoro A, Szolgay J, Tron S, van den Akker JHH, Viglione A, Blöschl G (2017):** Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resour Res* 53:5209–5219. <https://doi.org/10.1002/2017WR020723>
- Salazar S, Francés F, Komma J, Blume T, Francke T, Bronstert A, Blöschl G (2012):** A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of “retaining water in the landscape” in different European hydro-climatic regions. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:3287–3306. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3287-2012>
- Skublics D, Blöschl G, Rutschmann P (2016):** Effect of river training on flood retention of the Bavarian Danube. *J Hydrol Hydromech* 64(4):349–356. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0035>
- UNDRR (2015):** Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR2015). United Nations Office for Disaster Risk Reduction
- Viglione A, Blöschl G (2009):** On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrol Earth Syst Sci* 13:205–216
- Volpi E, Di Lazzaro M, Bertola M, Viglione A, Fiori A (2018):** Reservoir effects on flood peak

discharge at the catchment scale. *Water Resour Res* 54(11):9623–9636

Vorogushyn S, Apel H, Kemter M, Thielen AH (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer

Hochwasser. *Hydrol Wasserbewirts* 66:244–254. https://doi.org/10.5675/HyWa_2022.5_2

Wyzga B (1996): Changes in the magnitude and transformation of flood waves subsequent to the channelization of the Raba River, Polish Carpathians. *Earth Surf Process Landf* 21(8):749–763

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.