

Günter Blöschl, Miriam Bertola, David Lun, Alberto Viglione, Andrea Kiss & Jürgen Komma

Langfristige Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Europa

Long-term changes of flood probabilities in Europe

Die extremen Hochwasser der letzten Jahre unterstreichen die Dringlichkeit, langfristige Änderungen der Hochwasser und ihre Ursachen zu untersuchen. Dieser Beitrag berichtet Ergebnisse zu dieser Fragestellung, die im Rahmen des Teilprojektes 6 der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) erzielt wurden. Die Auswertungen verwenden einen umfangreichen Datensatz von Hochwasserbeobachtungen an Flüssen und ergänzende Informationen, um signifikante Veränderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu bestimmen und zu erklären. Die Daten zeigen, dass die hochwasserreichen Perioden im Zeitraum von 1500 bis 1940 in Europa deutlich kälter waren als sonst. In den letzten 60 Jahren hat die Zahl der hochwasserreichen Perioden in Nordwesteuropa zugenommen. Diese Zunahme ist auf intensivere Niederschläge zurückzuführen. In mittleren und großen Einzugsgebieten Süd- bzw. Osteuropas sind die geringere Bodenfeuchte und Schneebedeckung hingegen für eine Abnahme der Hochwasser verantwortlich. Mit diesen Ergebnissen soll eine Basis geschaffen werden für eine zuverlässigere Bestimmung der Hochwasserbemessungswerte in einer sich ändernden Welt.

Schlagwörter: Hochwasser, Jährlichkeit, Klimawandel, Trendanalyse, hydrologische Bemessung, Prozessursachen, Extremwerthydrologie

The extreme floods of recent years underline the urgency of studying long-term changes of floods and their driving processes. This paper reports results on this issue obtained within the framework of subproject 6 of the DFG research group SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods). The analyses use an extensive dataset of flood observations at rivers and complementary information to determine and explain significant changes in flood probabilities. The data show that the flood-rich periods of the last 500 years in Europe have been significantly colder than usual. Over the last 60 years, the number of flood-rich periods in north-western Europe has increased. This increase is due to more intense precipitation. In medium-sized and large catchments of southern and eastern Europe, on the other hand, lower soil moisture and less snow cover have led to decreasing flood probabilities. These results are intended as a basis for more reliable design flood estimates in a changing world.

Keywords: Floods, return period, climate change, trend analysis, hydrological design, process causes, flood frequency hydrology

1 Einleitung

Die zahlreichen Hochwasserkatastrophen in den letzten Jahren nähren die Befürchtung, dass die Wahrscheinlichkeit großer Hochwasser zugenommen hat. Das Extremereignis im Juli 2021 in Teilen West- und Mitteleuropas mit seiner besonders extremen Ausprägung im Ahrtal (VOROGUSHYN et al., 2022) ist nur eines von vielen. Im Mai/Juni 2016 waren Süddeutschland und Oberösterreich von extrem intensiven, lokalen Starkregenereignissen betroffen. Die Überflutungen im Mai 2014 am Balkan wurden durch ein untypisch stationäres Tief ausgelöst. Im Jahr 2013, nur elf Jahre nach dem Hochwasser von 2002, wurde Mitteleuropa erneut von einem verheerenden Hochwasser mit großen Schäden in Deutschland und Österreich heimgesucht (BLÖSCHL et al., 2013; KREIBICH et al., 2022). In vielen Einzugsgebieten sind die jüngsten Überschwemmungen viel größer als das größte jemals davor aufgezeichnete Ereignis. Es stellt sich daher die Frage, ob die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher extremen Hochwasser in den letzten Jahren tatsächlich zugenommen hat und welche Ursachen dafür verantwortlich sein könnten.

Die Brisanz der Fragestellung ergibt sich aus den gegebenenfalls notwendigen Anpassungen der Bemessungswerte für das Hochwasserrisikomanagement, sei es bei der Ausweisung von Hochwassergefährdungszonen, Alarmplänen und Bebauungsplänen, sei es für die Dimensionierung von Hochwasserschutzmaßnahmen wie Dämmen und Rückhaltebecken. Werden solche Anpassungen nicht durchgeführt, sind unproportional hohe Schäden und Gefährdung von Menschenleben zu erwarten.

Bemessungswerte des Hochwasserabflusses mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (oder Jährlichkeit) werden traditionell aus langen Beobachtungsreihen des Abflusses abgeleitet. Wegen des erhöhten Sicherheitsanspruchs und Veränderungen der hydrologischen Bedingungen ist dieser Ansatz aber nicht mehr ausreichend. Erforderlich ist heute eine umfassendere Vorgangsweise, die zusätzlich zur rein statistischen Auswertung von Hochwasserreihen zeitliche, räumliche und kausale Zusatzinformationen einbringt und das Hochwasser aus einer Zusammenschau der Gesamtinformation bestimmt (MERZ & BLÖSCHL, 2008; BLÖSCHL & MERZ, 2008; VIGLIONE et al., 2013). Zeitliche Informationen sind z. B. historische Hochwasser, räumliche Informationen sind Hochwasser in ähnlichen Gebieten der Region, und kausale Informationen betreffen die Prozesse der Hochwasserentstehung (Niederschlag, Abflussbeiwerte und ihre Änderung mit der Ereignisgröße und Saisonalität). Diese Vorgangsweise ist im Merkblatt DWA-M 552 der Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA, 2012) vorgesehen. Auf rein statistischer Basis abgeleitete Bemessungswerte sind dem Stand der Technik anzupassen, d. h. auf Basis von DWA-M 552 zu überarbeiten.

Die neue, umfassendere Vorgangsweise wird als "Extremwerthydrologie" im Gegensatz zur traditionellen "Extremwertstatistik" bezeichnet, da der Schwerpunkt verstärkt auf den hydrolo-

gischen Prozessen liegt. Dabei spielen auch die Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten eine große Rolle, und werden – sofern bekannt – direkt berücksichtigt.

Der Standardansatz zur Erkennung von Veränderungen der Hochwasserabflüsse an Flüssen ist die Trendanalyse langer Hochwasserreihen. Die Aussagekraft bei der Erkennung von Trends kann erhöht werden, wenn Aufzeichnungen von mehreren Pegeln zusammengeführt werden (HALL et al., 2014), wobei in diesem Fall die räumlichen Korrelationen der Hochwasserscheitel bedacht werden müssen. In Süd-, Mittel- und Westdeutschland wurde für 28 % der Stationen eine Zunahme bei Winterhochwasser beobachtet (PETROW & MERZ, 2009) mit einer Häufung hochwasserreicher Perioden (MERZ et al., 2016). Im alpinen Raum ist ein gewisser Anstieg der Frühjahrshochwasser im Zusammenhang mit einer früheren Schneeschmelze zu beobachten (BARD et al., 2012). In der Schweiz zeigen im Zeitraum 1966 bis 2000 insgesamt 42 % der Stationen einen signifikant steigenden Trend und nur 5 % einen signifikant fallenden Trend, wobei hochwasserreiche Perioden im Norden der Schweiz oft hochwasserarmen Perioden in Süden und umgekehrt entsprechen (SCHMOCKER-FAKEL & NAEF, 2010). In Österreich zeigen im Zeitraum 1976 bis 2007 insgesamt 16 % der Stationen einen signifikant steigenden Trend, im Zeitraum 1976 bis 2014 sind es 26 % (BLÖSCHL et al., 2018).

Für die Ermittlung von Bemessungshochwassern ist aber die Kenntnis eines Trends nicht ausreichend. Ebenso wichtig ist es, die Gründe für solche Trends zu kennen, um mit Zuversicht eine Extrapolation in die Zukunft zu wagen. Die wichtigsten Prozessursachen für die Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten sind Landnutzungsänderungen, Flussregulierungen und Klimaveränderungen (MERZ et al., 2012). Landnutzungsänderungen sind in der Regel nur für kleine Einzugsgebiete bedeutend und Flussregulierungen unmittelbar unterhalb des Eingriffes (BLÖSCHL, 2022b). Hochwasseränderungen infolge des Klimawandels sind sowohl für kleine als auch für große Gebiete relevant und werden durch das Wechselspiel von Starkregen, Bodenfeuchte, Verdunstung und Schneeprozessen bestimmt (HALL et al., 2014; BLÖSCHL, 2022a). Unterschiede der Einflussgrößen sind regional, nach Gebietsgröße und nach Seltenheit der betrachteten Ereignisse zu erwarten. Beobachtete Hochwasseränderungen werden häufig qualitativ mit Veränderungen der Prozessursachen (wie z. B. Wetterlagen, PETROW et al., 2009) in Verbindung gebracht, während formale Methoden verhältnismäßig selten angewendet werden. Letztere sind aber für tragfähige Aussagen betreffend Bemessungshochwasser unerlässlich.

Ziel dieses Artikels ist es, die Veränderungen von Hochwasserwahrscheinlichkeiten und deren auslösenden Prozessen in Europa auf konsistente Weise zu analysieren, wobei (a) eine regional vergleichende Betrachtung gewählt wird, um die Aussagekraft der Interpretationen zu stärken, und (b) neue Methoden entwickelt werden, um signifikante Veränderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu bestimmen und zu erklären. Damit wird die Basis für eine zuverlässigere Bestimmung der Hochwasserbemessungswerte für die Zukunft geschaffen.

2 Daten und Methoden

In dieser Studie wurden Zeitreihen der jährlichen Abflussscheitel aus einer neu verfügbaren Hochwasserdatenbank analy-

siert, die Messungen für etwa 7.000 Pegel im Zeitraum 1960 bis 2020 umfasst (HALL et al., 2015) (https://github.com/tuwhydro/europe_floods). Die Einzugsgebietsflächen reichen von 5 bis 100.000 km². Stationen, die von starken anthropogenen Veränderungen betroffen sind wie z. B. große Stauseen stromaufwärts der Pegel, wurden nicht verwendet (BLÖSCHL et al., 2019). Je nach Auswertung wurden die verwendeten Stationen weiter eingeschränkt, z. B. um eine Mindestreihenlänge von 50 Jahren bei Trendanalysen zu gewährleisten. Einzugsgebietsgrenzen der Stationen wurden aus der CCM River and Catchment Database (VOGT et al., 2007) abgeleitet. Täglicher gerasterter Niederschlag und Lufttemperaturdaten wurden aus dem E-OBS-Datensatz (CORNES et al., 2018) gewonnen. Ergänzt wurde dieser Datensatz durch Hochwasserreihen für den Zeitraum 1500 bis 2016, welche aus archivarischen Quellen abgeleitet wurden (Chroniken und andere Erzählquellen, Verwaltungs- und Gerichtsakten, Zeitungen sowie privater und offizieller Korrespondenz, BLÖSCHL et al., 2020). Dafür wurden fast ausschließlich zeitgenössische Unterlagen wegen ihrer höheren Zuverlässigkeit verwendet. Die textlichen Informationen wurden in einen dreistufigen Intensitätsindex umgewandelt, der mittlere (Klasse 1), große (Klasse 2) und extrem große (Klasse 3) Ereignisse unterscheidet. Dadurch ergaben sich die Größe und das Datum von fast 10.000 Hochwasserwerten an 103 Flussläufen in ganz Europa. Systematische Fehler, die sich daraus ergeben, dass am Anfang des Zeitraumes 1500 bis 2016 weniger Informationen vorhanden sind als am Ende, wurden korrigiert (BLÖSCHL et al., 2020).

In einem ersten Schritt der Auswertungen wurde die räumliche Verteilung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Europa untersucht als Basis für die Analyse der Veränderungen. Für jede der Stationen wurden die statistischen Momente Mittelwert (Mean Annual Flood, MAF, ausgedrückt als Abflussspende) und Variationskoeffizient (CV) aus den Reihen der Jahreshöchsthochwasser geschätzt. Um ihre regionale Verteilung zu erklären wurden Mehrfachregressionen zwischen MAF bzw. CV und potenziellen Einflussgrößen (z. B. Jahresniederschlag, Winter- bzw. Sommerniederschlag, Ariditätsindex; Potentielle Verdunstung geteilt durch Jahresniederschlag) ausgewertet. Um zu beurteilen, welche der Einflussgrößen in jeder Regression die größte Erklärungskraft besitzt, wurde eine Dominanzanalyse durchgeführt (AZEN & BUDESCU, 2003). Als Maß für die Dominanz wurde jene Zunahme der Güte des Regressionsmodells gewählt, die entsteht, wenn eine zusätzliche Einflussgröße in die Beziehung aufgenommen wird. Die Regressionen wurden getrennt für Regionen in Europa durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wurden hochwasserreiche Perioden bestimmt. Unter Periode wird in diesem Zusammenhang ein Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnte verstanden. Für den Datensatz historischer Hochwasser (1500 bis 2016) erfolgte dies durch raum-zeitliche Interpolation des dreistufigen Intensitätsindex und folgender Gruppierung benachbarter Raum-Zeit-Regionen, die einen Intensitätsschwellenwert überschreiten. Für den Datensatz systematischer Hochwassermessungen (1960 bis 2020) erfolgte dies unter Verwendung der Scan-Statistik (GLAZ et al., 2001). Dabei wurde für jede Station ausgezählt, wie oft die Scheitelabflüsse innerhalb eines Zeitfensters (wurde variiert mit 5, 10, 15 Jahren) den mit einer bestimmter Jährlichkeit (wurde variiert mit 2, 5, 10 Jahren) verbundenen Durchfluss überschreitet. Die so ermittelte Anzahl wurde mit der Anzahl verglichen,

die für eine unabhängige und identisch verteilte Zufallsvariable zu erwarten wäre, und falls Erste signifikant (p -Wert < 0.05) größer war als die zweite, wurde die betreffende Periode als hochwasserreich gewertet. Die Jährlichkeit der Scheiteldurchflüsse wurde mit Ordnungsstatistik aus den Gesamtreihen bestimmt. Für die systematischen Reihen wurden auch hochwasserarme Perioden in ähnlicher Weise ausgewiesen. Ergänzend dazu wurde für jede Reihe der Trend berechnet mittels der Theil-Sen Methode, seine Signifikanz mit dem Mann-Kendall-Test überprüft und die regionalen Trends durch räumliche Interpolation bestimmt.

In einem dritten Schritt wurden die Veränderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten ihren Prozessursachen zugewiesen. Dies erfolgte mittels eines regionalen Attributierungsmodells als Funktion der Einzugsgebietsgröße. Das Modell nimmt an, dass die Hochwasserscheitel einer nicht-stationären regionalen Gumbel-Verteilung folgen, wobei das mittlere jährliche Hochwasser (MAF) und der 100-jährige Wachstumsfaktor (Verhältnis HQ_{100} zu MAF) als Parameter verwendet werden. Diese beiden Parameter können im Laufe der Zeit und zwischen den Einzugsgebieten in Abhängigkeit von bestimmten Einflussgrößen (Niederschlag, Bodenfeuchte, Schneeschmelze) variieren. Zeitreihen der Einflussgrößen wurden aus Messungen bzw. Modellen abgeleitet. Die Beiträge der Einflussgrößen zur Erklärung der Veränderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten wurden mittels Bayes-Statistik geschätzt. Dies erfolgte durch Vorgabe einer a priori-Verteilung der Modellparameter, um die Werte auf einen plausiblen Bereich einzuschränken, und Schätzung der Posterior-Verteilung mittels der Markov-Chain-Monte Carlo-Methode.

3 Räumliche Verteilung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten und ihrer Einflussgrößen

Die größten Werte des mittleren jährlichen Hochwassers (MAF) treten in den feuchten, gebirgigen Regionen Europas auf, darunter die Alpen, der Apennin, der Flyschgürtel der Karpaten, die an das ligurische und adriatische Meer grenzenden Küstenregionen, sowie die Westküsten Großbritanniens und Norwegens (Abb. 1a). Die niedrigsten MAF-Werte treten in den flachen Regionen auf, z. B. in den nord- und osteuropäischen Ebenen, in der Dnjepr-Niederung, im finnischen Seengebiet sowie in Südschweden und Südostengland. Die räumliche Verteilung des Variationskoeffizienten (CV) ist bis zu einem gewissen Grad ein Spiegelbild derjenigen des MAF. Allerdings gibt es Abweichungen von diesem allgemeinen Muster. Entlang der Mittelmeerküste zwischen Genua und Valencia sind die CV recht groß, obwohl die MAF ebenfalls groß sind. Dies hängt mit der steilen Topographie in Küstennähe und den hohen Niederschlägen zusammen (LUN et al., 2021).

In Abbildung 1 sind als farbiger Hintergrund die MAF bzw. CV, die aus einer räumlichen Interpolation der Stationswerte ermittelt wurden, dargestellt und als Punkte die Schätzungen aus der Mehrfachregression. Der Median des absoluten normierten Fehlers der regionalen Mehrfachregression (unterschiedliche Parameter je nach Region) von MAF bzw. CV liegt europaweit bei 37 % bzw. 18 %. Dies bedeutet, dass der Fehler des CV etwa halb so groß ist wie der des MAF. Dies dürfte mit der geringeren räumlichen Variabilität von CV im Vergleich zum MAF zusammenhängen. Für Bemessungszwecke in unbeobachteten Einzugsgebieten (ohne Abflussdaten) sind derartige Fehler freilich zu groß, und lokale Studien sind erforderlich unter Anwendung der

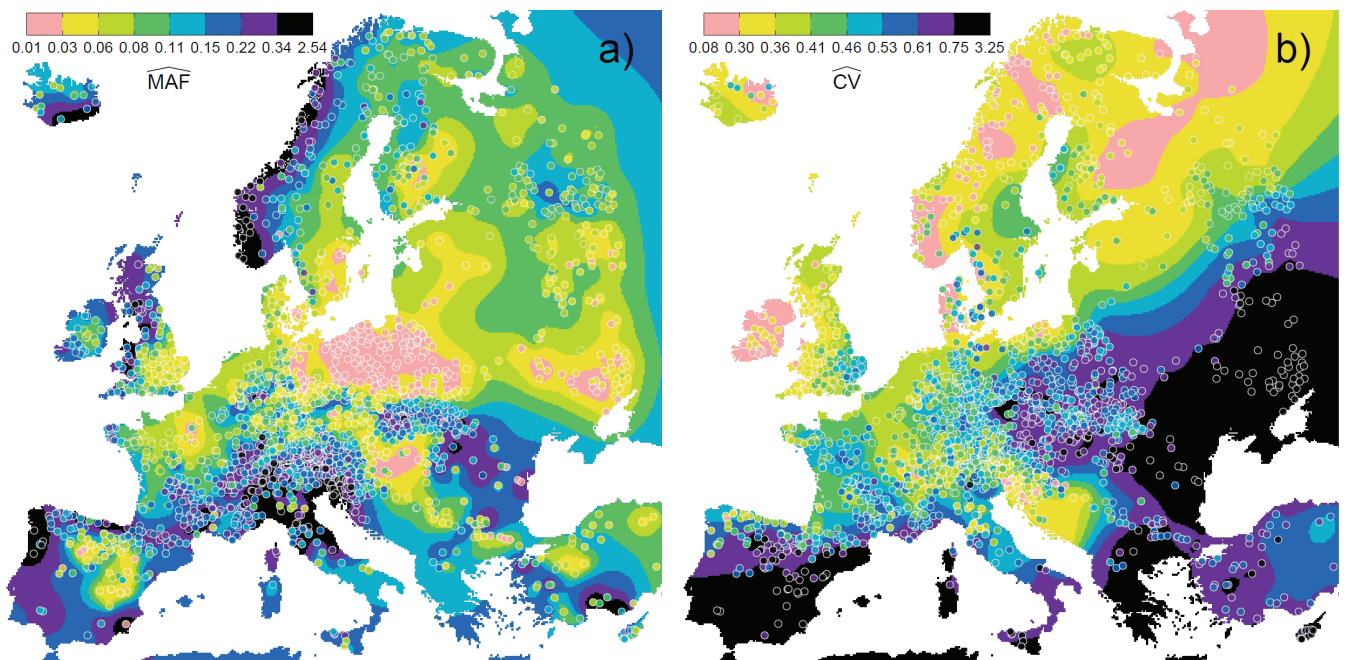
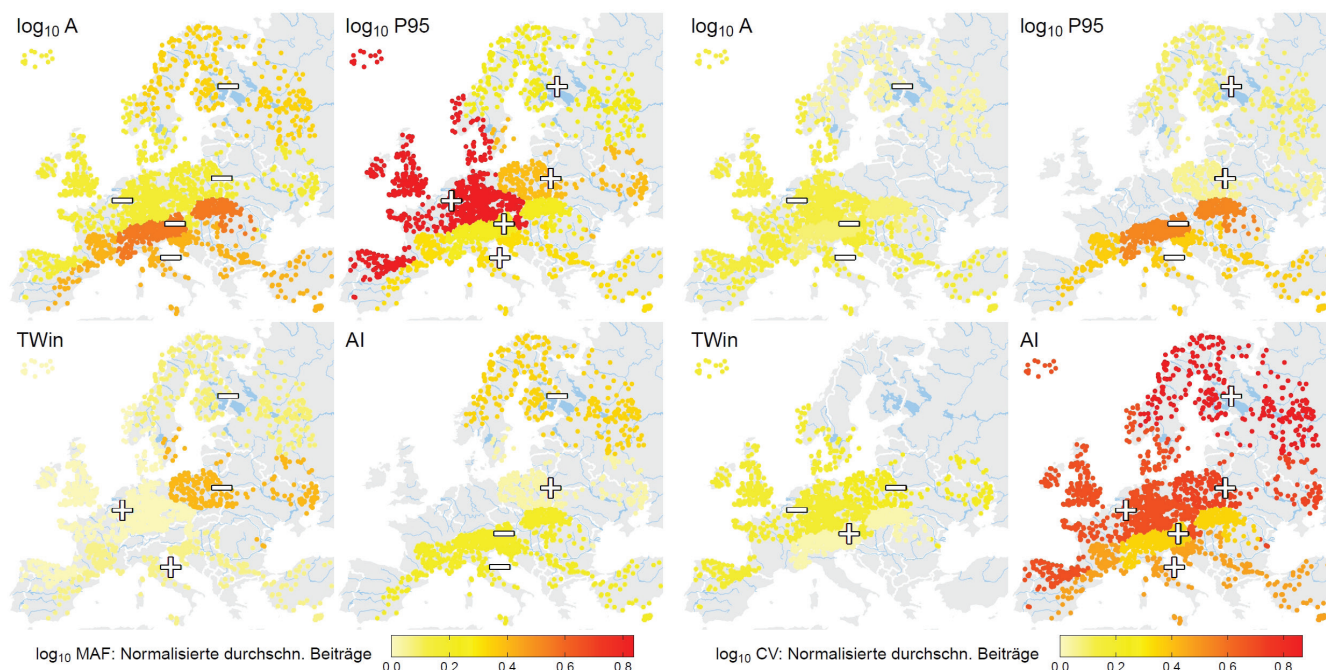


Abbildung 1

Mittleres jährliches Hochwasser (MAF) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) und Variationskoeffizient (CV) bestimmt mittels eines regionalen Regressionsmodells (Punkte) bzw. mittels Kriging (Fläche im Hintergrund) (aus: LUN et al., 2021).

Mean annual flood (MAF) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) and coefficient of variation (CV) estimated using a regional regression model (dots) and kriging (background shading) (from: LUN et al., 2021).


Abbildung 2

Einflussgrößen der räumlichen Verteilung des mittleren jährlichen Hochwassers (MAF, links) und des Variationskoeffizienten (CV, rechts) auf Basis der Dominanzanalyse für regionale Regressionsmodelle. Die Felder zeigen die durchschnittlichen Beiträge der in die Regressionen einbezogenen Einflussgrößen (Logarithmus der Einzugsgebietsfläche, Logarithmus des Extremniederschlagsindex P95, mittlere Wintertemperatur und Ariditätsindex AI). Plus- und Minuszeichen geben die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten an (aus: LUN et al., 2021).

Explanatory variables of the spatial distribution of the mean annual flood (MAF, left) and the coefficient of variation (CV, right) based on dominance analysis for regional regression models. The panels show the average contributions of the influencing variables included in the regressions (logarithm of the catchment area, logarithm of the extreme precipitation index P95, mean winter temperature and aridity index AI). Plus and minus signs indicate the signs of the regression coefficients (from: LUN et al., 2021).

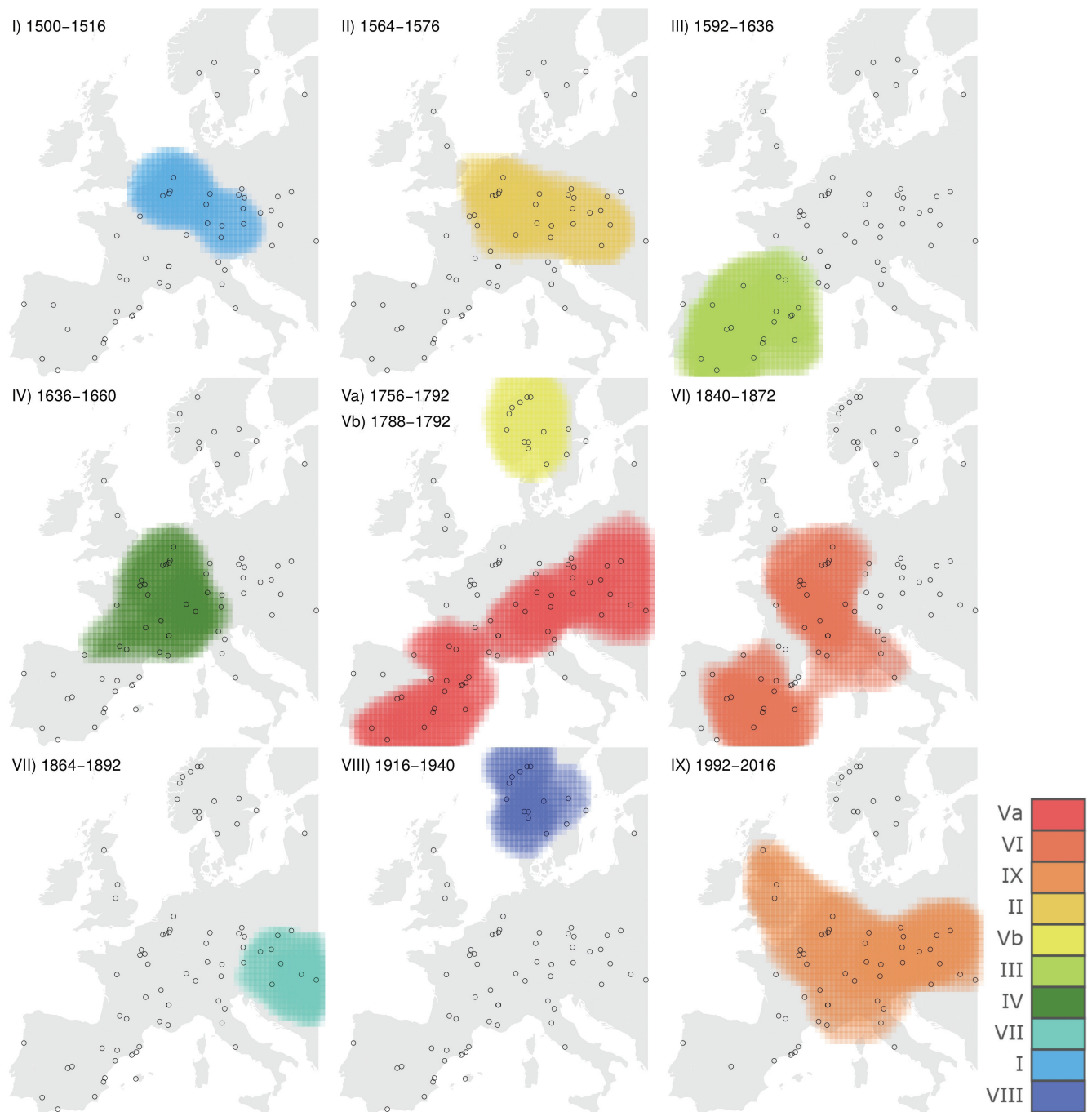
Extremwerthydrologie. Auf europäischer Ebene sind die Gesamtmuster der berechneten Momente den Beobachtungen sehr ähnlich und für eine Interpretation von Veränderungen hilfreich.

Die Einflussgrößen, die in den Regressionen die größte räumliche Erklärungskraft haben, sind in Abbildung 2 dargestellt. Für das mittlere jährliche Hochwasser (MAF, Abb. 2 links) ist die Einzugsgebietsfläche in allen Regionen eine relevante Einflussgröße (negatives Vorzeichen in Abbildung 2 bedeutet, dass die Abflusspende mit der Gebietsfläche abnimmt). In der atlantischen Region ist der Extremniederschlagsindex P95 (Tagesniederschlag, der im Mittel an 95 % der Tage eines Jahres unterschritten wird) die bei weitem relevanteste Variable, wie man erwarten würde, da die Hochwasser vorwiegend im Winter auftreten, wenn die Bodenfeuchte hoch ist, und damit der Ereignisniederschlag eng mit den Hochwasserabflüssen korreliert ist (BLÖSCHL et al., 2019; KEMTER et al., 2020). Für den CV (Abb. 2, rechts) ist der Ariditätsindex die europaweit wichtigste Variable, da die Kombination aus Verdunstung und Niederschlag die typische Vorbeefeuchtung des Bodens offensichtlich gut erfasst, und da trockene Gebiete eher nicht-lineare Abflussbildungsprozesse aufweisen und somit einen hohen CV besitzen (VIGLIONE et al., 2009). Zudem weisen aride Regionen in der Regel eine größere zwischenjährliche Niederschlagsvariabilität auf (FATICCHI et al., 2012). Eine Ausnahme bildet die Alpenregion, in der P95 einen größeren Anteil an der räumlichen Variabilität der CV erklärt als AI. Dies dürfte mit den hohen orographischen Niederschlägen am Alpennordrand zusammenhängen.

4 Hochwasserreiche Perioden in den letzten 500 Jahren und ihre Einflussgrößen

Die Auswertungen der historischen Hochwasserreihen ergeben neun dominante Hochwasserperioden im Zeitraum von 1500 bis 2016 (Abb. 3). Diese sind zeitlich ziemlich regelmäßig verteilt, aber der jüngste 30-Jahres-Zeitraum ist von früheren Zeiträumen durch eine 90-jährige Katastrophenlücke getrennt, in der nur wenige große Hochwasser auftraten. Dies ist im Einklang mit anderen historisch-klimatologischen Untersuchungen (PFISTER, 2009). Die am höchsten eingestuften hochwasserreichen Perioden, basierend auf ihrer räumlich-zeitlichen Ausdehnung und Hochwasserintensität, waren 1560 bis 1580 (Periode II in West- und Mitteleuropa), 1760 bis 1800 (Periode V in den meisten Teilen Europas), 1840 bis 1870 (Periode VI in West- und Südeuropa) und 1990 bis 2016 (Periode IX in West- und Mitteleuropa). Die neun Perioden überdeckten Flächen zwischen 0,41 und 1,83 Millionen km², und traten in Mittel- und Westeuropa häufiger auf als in anderen Regionen. Die jüngste hochwasserreiche Periode ist 1990 bis 2016, die zweitgrößte in Bezug auf die räumliche Ausdehnung (1,77 Millionen km²) und die drittgrößte in Bezug auf die räumlich-zeitliche Ausdehnung (18,7 Millionen km² x-Jahre). Das Jahr 2016 stellt das Ende der Daten dar, aber möglicherweise nicht das Ende dieser hochwasserreichen Periode.

Die durchschnittlichen Lufttemperaturen in den meisten mitteleuropäischen hochwasserreichen Perioden waren etwa 0,3 °C

**Abbildung 3**

Hochwasserreiche Perioden in Europa. Die Perioden sind nach ihrem Rang eingefärbt, wobei rot (Periode Va) die stärkste und blau (Periode VIII) die schwächste Periode ist (aus: BLÖSCHL et al., 2020).

Flood rich periods in Europe. The periods are coloured according to their rank, with red (period Va) indicating the strongest and blue (period VIII) the weakest (from: BLÖSCHL et al., 2020).

niedriger als in den Intervallen dazwischen (Abb. 4). Die hochwasserreiche Periode II war besonders kalt und ist bekannt für die großen Gletschervorstöße in den Alpen (NICOLUSSI et al., 2006). Die Vertrauensbereiche der Temperaturen in den meisten hochwasserreichen Perioden der Vergangenheit liegen unter der 1:1-Linie im Vergleich zu den Zwischenperioden (Abb. 4b). Die einzige Ausnahme war die Periode IV (1630 bis 1660) mit einer ähnlichen mittleren Jahrestemperatur wie in den Jahren davor und danach, was auf warme Sommer zurückzuführen ist,

während die Herbst- und Wintermonate, in denen die meisten Hochwasser auftraten, deutlich kälter waren als üblich (GLASER, 2013). Auch in anderen Teilen Europas waren die hochwasserreichen Perioden meist kälter als die Zwischenperioden. Während hochwasserreiche Perioden in der Vergangenheit meist mit vergleichsweise kalten Lufttemperaturen einhergingen, ist dies für die jüngste hochwasserreiche Periode IX nicht der Fall, die im Durchschnitt in allen Regionen etwa 1,4 °C wärmer war als die vorangegangene Zwischenperiode.

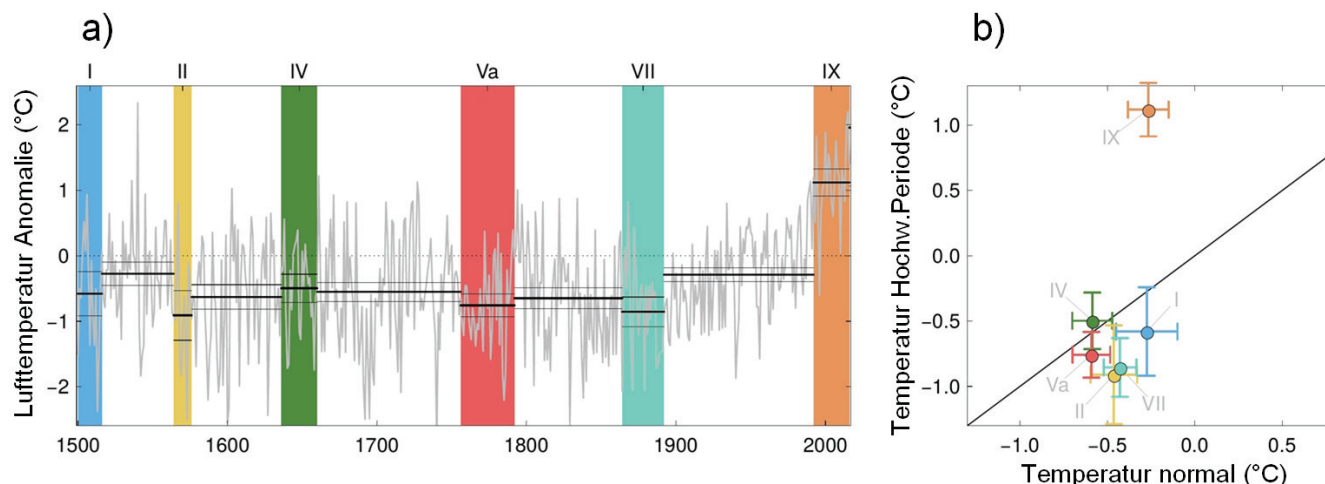


Abbildung 4

Anomalien der jährlichen Lufttemperatur gegenüber ihrem Mittelwert von 1961 bis 1990 in und zwischen hochwasserreichen Perioden in Mitteleuropa. (a) Zeitreihen der Lufttemperaturanomalien (graue Linie) sowie deren Mittelwerte und 90 % Vertrauensbereiche (schwarze Linien). Farbige Balken kennzeichnen die hochwasserreichen Perioden aus Abbildung 3. (b) Vergleich der durchschnittlichen Temperaturanomalien in hochwasserreichen Perioden und denen der dazwischen liegenden Intervalle. Die Fehlerbalken zeigen die mittels Bootstrapping ermittelten 90 % Vertrauensbereiche (aus: BLÖSCHL et al., 2020).

Anomalies of annual air temperatures from their 1961 to 1990 mean within and outside flood-rich periods in Central Europe. (a) Time series of air temperature anomalies (grey line) and their averages and 90 % confidence bounds (black lines). Coloured bars indicate the flood-rich periods from Fig. 3. (b) Relationship between average temperature anomalies in flood-rich periods and those of the intervals in between. Error bars show 90 % confidence bounds (from: BLÖSCHL et al., 2020).

5 Hochwasserreiche Perioden in den letzten 60 Jahren

Für die letzten 60 Jahre stand ein wesentlich detaillierter Datensatz als für die letzten 500 Jahre zur Verfügung, somit können die Aussagen des vorhergehenden Abschnittes geschärft werden. Als Methode kam dafür nicht eine raum-zeitliche Interpolation zur Anwendung, sondern Methoden der Scan-Statistik, mit denen die statistische Signifikanz der hochwasserreichen Perioden bestimmt wurde (Abb. 5).

Die Daten zeigen, dass die Häufigkeit der Überschreitung eines vorgegebenen Schwellenwertes des Abflusses (2-jährlich, 5-jährlich, 10-jährlich) etwa zwei- bis viermal größer als für reine Zufallsreihen ist. Dies bedeutet, dass eine zeitliche Häufung von großen Ereignissen (hochwasserreiche und hochwasserarme Perioden auf 5 %-Signifikanzniveau) in den Reihen existiert, wenn auch bei weitem nicht in allen Reihen. Zum Beispiel zeigen bei einem 2-jährlichen Hochwasserschwellenwert 8,1 % der Stationen hochwasserreiche Perioden, ein deutlich größerer Wert als bei zufälligen Reihen der gleichen Länge, bei denen er 3,4 % betragen würde. Das Auftreten von hochwasserreichen Perioden variiert zeitlich und räumlich (Abb. 6). Im Nordwesten Europas nehmen die hochwasserreichen Perioden in den 1980er Jahren rasant zu. Im Osten und Süden Europas hingegen dominieren hochwasserreiche Perioden von 1960 bis 1970, gefolgt von einer klaren Abnahme, die bis zum Jahr 2020 anhält. Im Nordwesten tritt der Übergang bei den 2-jährlichen Schwellenwerten früher auf als bei den höheren Schwellenwerten, im Süden hingegen später. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den 1970er Jahren hochwasserarme Perioden bei 2-jährlichen Schwellenwerten für eine Gruppe von Pegeln in Deutschland, Belgien und Dänemark auftreten. Gleichzeitig

gab es in diesen Jahren einen Aufwärtstrend des Nordatlantischen Oszillationsindex (HURRELL et al., 2003), der einen starken Einfluss auf Hochwasser in Nordwesteuropa hat (STEIROU et al., 2019).

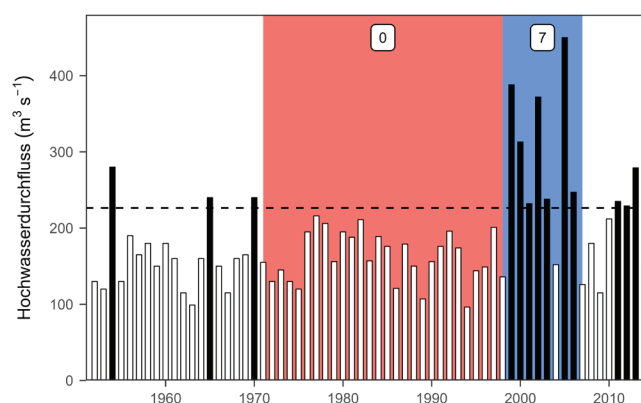
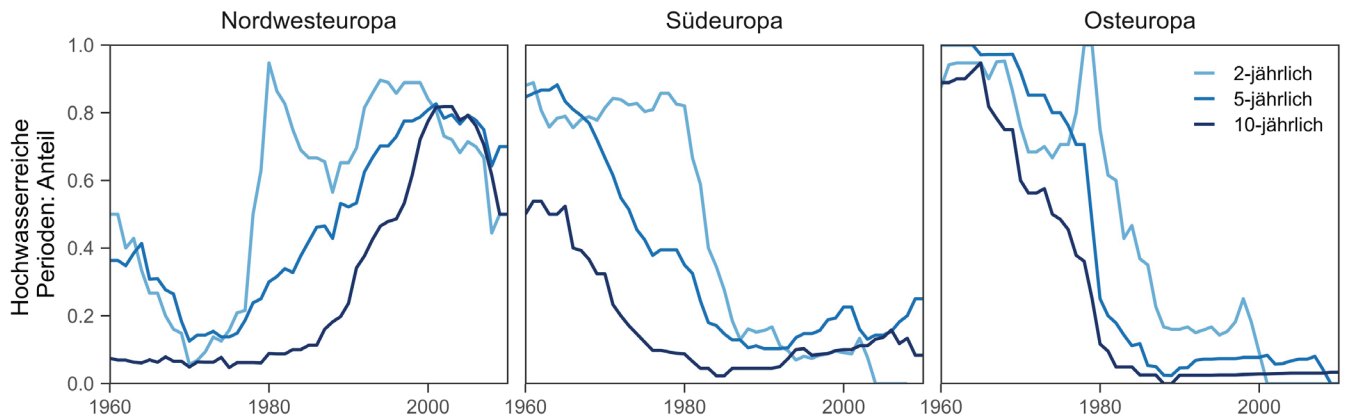


Abbildung 5

Schema der Scan-Statistik angewendet auf Hochwasserdaten der Bregenzerach in Mellau, Vorarlberg (227 km² Einzugsgebietsfläche). Die gestrichelte Linie zeigt als Beispiel den mit Hilfe der Ordnungsstatistik geschätzte Schwellenwert eines 5-jährlichen Hochwassers. Der blaue Bereich kennzeichnet eine Teilmenge mit einer ungewöhnlich hohen Anzahl von Überschreitungen, während der rote Bereich eine Teilmenge mit ungewöhnlich wenigen Überschreitungen kennzeichnet (nach: LUN et al., 2020).

Scheme of scan statistics applied to flood data: Dotted line indicates the threshold of a 5-year flood estimated via order statistics. The blue area denotes a subset with an unusually high number of exceedances, whereas the red area denotes a subset with unusually few exceedances (after: LUN et al., 2020).

**Abbildung 6**

Relativer Anteil (%) von Stationen, die in einem bestimmten Jahr eine hochwasserreiche Periode aufweisen an allen Stationen, die in diesem Jahr entweder eine hochwasserreiche (FR) oder hochwasserarme (FP) Periode aufweisen ($FR/(FR+FP)$) für unterschiedliche Hochwasserschwellenwerte (2, 5, 10-jährlich) in drei Regionen Europas (nach: LUN et al., 2020).

Relative proportion (%) of stations having a flood-rich period in a given year out of all stations having either a flood-rich (FR) or flood-poor (FP) period in that year ($FR/(FR+FP)$) for different flood thresholds (return periods of 2, 5, 10 years) in three regions of Europe (after: LUN et al., 2020).

6 Trends der Hochwasserwahrscheinlichkeiten

Die Bestimmung von hochwasserreichen Perioden erlaubt eine gute zeitliche Auflösung der Veränderungen. Hingegen sind die räumlichen Unterschiede leichter bei Trendanalysen darzustellen. Die Hochwasserdaten zeigen ein klares regionales Muster der Hochwassertrends in Europa (Abb. 7a). Bezogen auf die mittleren Hochwasserabflüsse im Zeitraum von 1960 bis 2010 reichen die regionalen Trends von einer Zunahme von 11 % bis zu einer Abnahme von 23 % pro Jahrzehnt. Die Unsicherheiten der regionalen Trends sind gering, typischerweise zwischen 1 % und 2 % pro Jahrzehnt (BLÖSCHL et al., 2019). Die räumlichen Muster der Trends lassen sich in drei Hauptregionen gruppieren. In Nordwesteuropa (Abb. 7a, Region 1) zeigen etwa 69 % der Stationen einen zunehmenden Trend mit einer durchschnittlichen Zunahme von 2 % pro Jahrzehnt. In Südeuropa (Region 2) zeigen etwa 74 % der Stationen einen rückläufigen Trend, mit einer durchschnittlichen Abnahme von 5 % pro Jahrzehnt. In Osteuropa (Region 3) zeigen etwa 78 % der Stationen einen rückläufigen Trend mit einer durchschnittlichen Abnahme von 6 % pro Jahrzehnt. Während frühere Studien kein klares Signal in den Beobachtungen erkennen konnten (SVENSSON et al., 2006), zeigt diese Studie aufgrund der viel umfangreicheren Datenbasis ein sehr klares Muster.

Für den deutschen Sprachraum und angrenzende Regionen zeigt Abbildung 7b regionale Hochwassertrends unter Verwendung nur solcher Stationen, die einen signifikanten Trend aufweisen. Durch die ausschließliche Verwendung signifikanter Stationen wird das Muster noch eindeutiger. In Österreich lässt sich der Alpenhauptkamm als Klimascheide gut erkennen mit deutlichen Zunahmen nördlich der Alpen. In Deutschland ergibt sich eine Klimascheide von der ostfriesischen Nordseeküste bis zur Lausitz mit deutlichen Zunahmen südwestlich davon.

Die Auswertungen in Abbildung 7 gelten für das 2-jährliche Hochwasser (HQ2), da die Trends mittels der Theil-Sen Methode unter Verwendung einer Jahreshochwasserreihe berechnet wurden. Für die Praxis sind aber größere Jährlichkeiten interessanter,

z. B. das 100-jährliche Hochwasser (HQ100). Wegen der großen Unsicherheiten lassen sich Trends für große Jährlichkeiten nicht aus einzelnen Reihen bestimmen, eine regionale Untersuchung unter gleichzeitiger Verwendung vieler Reihen erlaubt dies hingegen. Zu diesem Zweck wurde ein regionales Hochwasserwahrscheinlichkeitsmodell an die Hochwasserreihen in Europa angepasst, und zwar jeweils für überlappende Rasterzellen von $600 \times 600 \text{ km}^2$ (BERTOLA et al., 2020). In kleinen Gebieten Nordwesteuropas (Abb. 8a, $A = 10 \text{ km}^2$) nehmen die Trends sowohl für das HQ2 als auch für das HQ100 um ca. 5 % pro Jahrzehnt zu. In großen Gebieten ($A = 100.000 \text{ km}^2$) ändert sich das HQ2 hingegen kaum, während das HQ100 um ca. 3 % pro Jahrzehnt abnimmt. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass Hochwasser in großen Gebieten oft durch synoptische Ereignisse, in kleinen Gebieten hingegen durch konvektive Ereignisse ausgelöst werden (BLÖSCHL et al., 2022a), wobei für die Letzteren eine stärkere Zunahme erwartet wird (IPCC, 2021; FOWLER et al. 2021). In Südeuropa nehmen die häufigeren Hochwasser tendenziell stärker ab als die seltenen, und dies könnte den geringeren Einfluss der Bodenfeuchte bei großen Ereignissen widerspiegeln, die in einem wärmeren Klima tendenziell abnimmt. Einschränkend ist hier anzumerken, dass die Datenbank keine Reihen für sehr kleine Gebiete ($A < 10 \text{ km}^2$) enthält, in denen Hochwasser zufolge häufigerer Gewitter (BAN et al., 2015) und Landnutzungsänderungen (ROGGER et al., 2017) deutlich größer werden könnten. In Osteuropa sind die Trends bei kleinen und großen Ereignissen ähnlich negativ und nehmen mit der Gebietsfläche stark ab. Dies lässt sich durch die typischerweise große räumliche Ausdehnung der Schneeschmelze erklären, die hier relevant sein dürfte.

7 Einflussgrößen auf die Trends der Hochwasserwahrscheinlichkeiten

Während die Erklärungen der Trends in Abbildung 8 qualitativ sind, erlaubt die Anwendung eines regionalen Attributierungsmodells eine objektive Ausweisung der Prozessursachen. Bei dem Attributierungsmodell werden die Parameter der regionalen Verteilungsfunktion des Hochwassers angesetzt in Abhän-

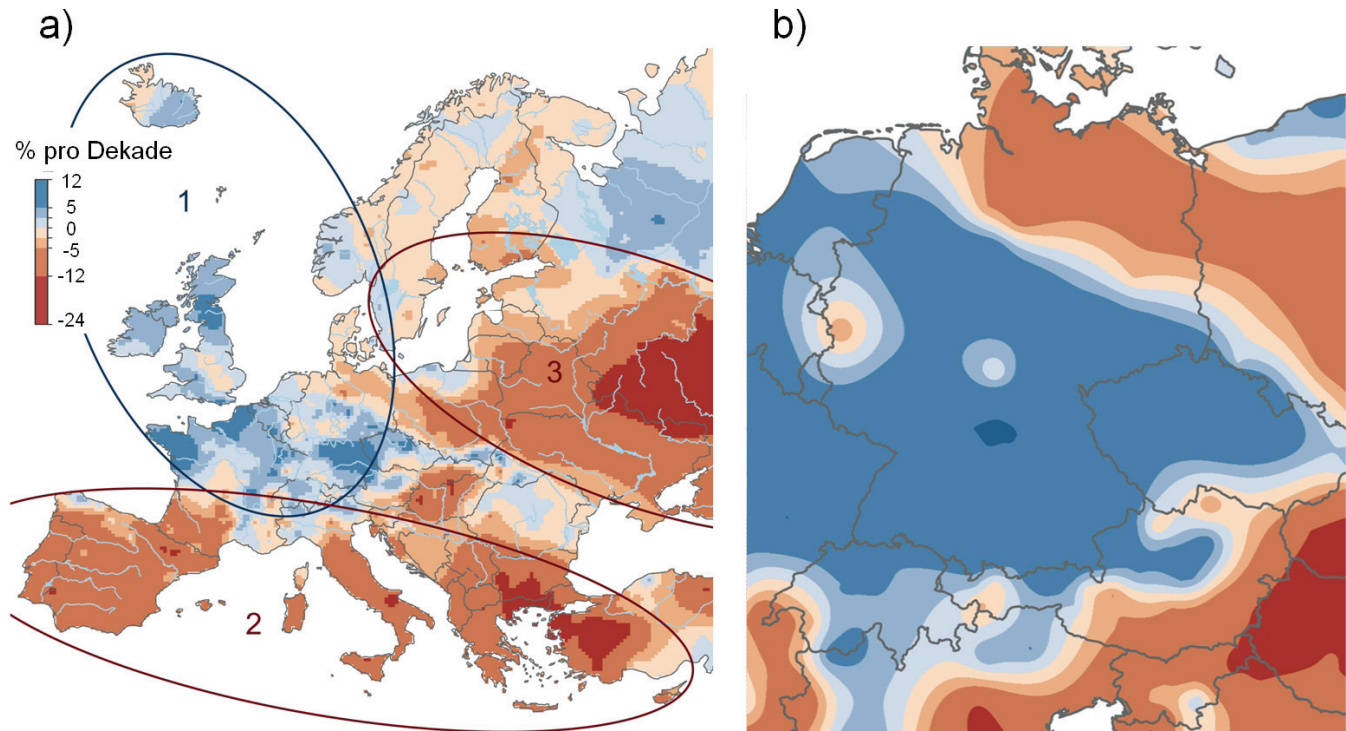


Abbildung 7

Beobachtete regionale Trends der Hochwasserabflüsse in Europa (1960 bis 2010). Blau bedeutet steigende Hochwasserabflüsse, rot sinkende Hochwasserabflüsse (prozentuale Änderung des mittleren jährlichen Hochwasserabflusses pro Jahrzehnt). (a) Regionale Trends unter Verwendung aller Stationen ($n = 2370$). Die Ziffern 1-3 bezeichnen Nordwesteuropa (Zunahme), Südeuropa (Abnahme) und Osteuropa (Abnahme) (b) Regionale Trends unter Verwendung nur solcher Stationen, die einen signifikanten Trend aufweisen ($n = 664$), Ausschnitt für Deutschland, Schweiz und Österreich (aus: BLÖSCHL et al., 2019).

Observed regional trends of flood discharges in Europe (1960 to 2010). Blue indicates increasing flood discharges, red denotes decreasing flood discharges (in percentage change of the mean annual flood discharge per decade). (a) Regional trends using all stations ($n = 2370$). Numbers 1-3 indicate north-western Europe, southern Europe and eastern Europe (b) Regional trends using only those stations with a significant trend ($n = 664$), detail for Germany, Switzerland and Austria (from: BLÖSCHL et al., 2019).

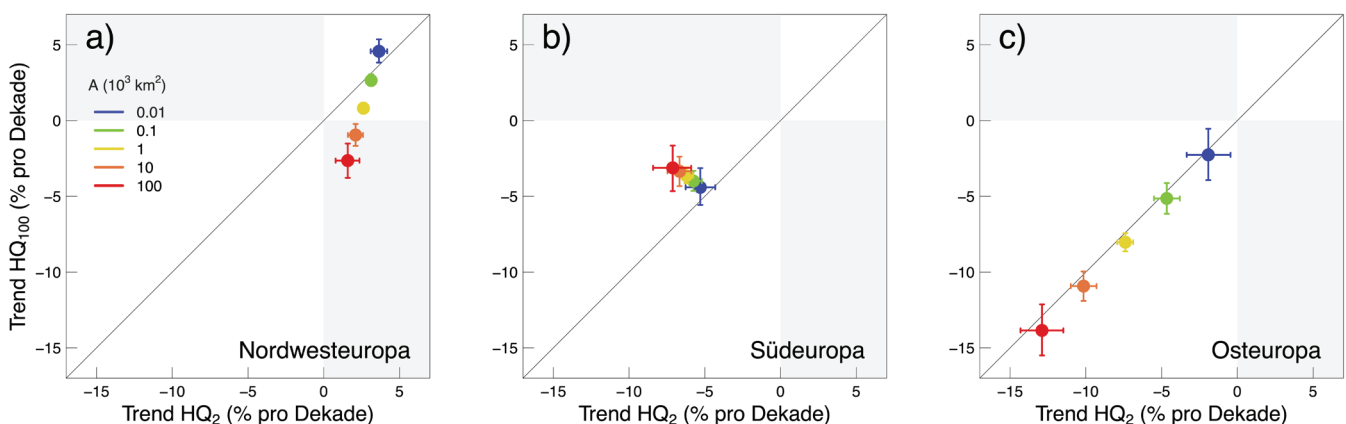
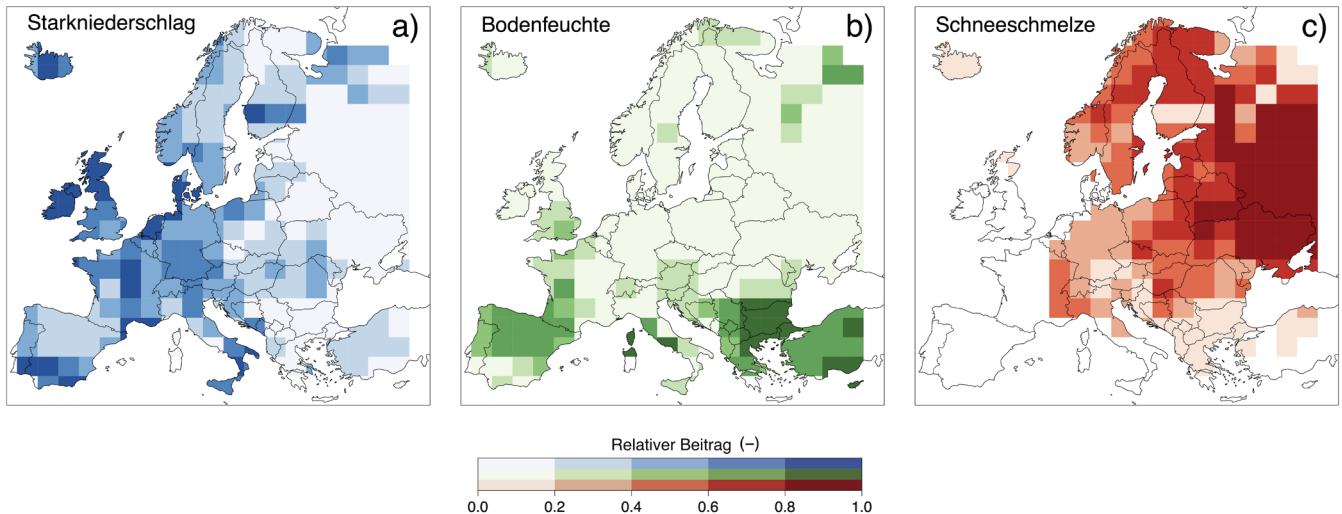


Abbildung 8

Regionaler Trend bei großen (HQ100) und kleinen (HQ2) Hochwassern in (a) Nordwesteuropa, (b) Südeuropa und (c) Osteuropa für fünf hypothetische Einzugsgebiete mit einer Fläche A. Die Abbildung zeigt den Median (Punkte) und die 90 % Vertrauensbereiche (Fehlerbalken) der regionalen Trends. Der Auswertungszeitraum ist 1960 bis 2010 und die Trends sind bezogen auf das Jahr 1985 (aus: BERTOLA et al., 2020).

Regional trend in large (HQ100) and small (HQ2) floods in (a) northwestern Europe, (b) southern Europe and (c) eastern Europe for five hypothetical catchments of area A. The figure shows the median (points) and the 90 % confidence intervals (error bars) of the regional trends. The analysis period is 1960 to 2010 and the trends refer to 1985 (from: BERTOLA et al., 2020).

**Abbildung 9**

Relative Beiträge von Extremniederschlägen (a), Bodenfeuchte (b) und Schneeschmelze (c) zu den beobachteten Veränderungen des zweijährlichen Hochwassers HQ2 im Zeitraum von 1960 bis 2010 für ein hypothetisches Einzugsgebiet von 1.000 km² (aus: BERTOLA et al., 2021).

Relative contributions of extreme precipitation (a), antecedent soil moisture (b) and snowmelt (c) to observed changes in the two-year flood HQ2 in the period from 1960 to 2010 for a hypothetical catchment of 1.000 km² (from: BERTOLA et al., 2021).

gigkeit von hydrologischen Einflussfaktoren, und mit Bayes'scher Inferenz geschätzt (BERTOLA et al., 2021). Als Einflussfaktoren wurden veränderte Niederschläge, Bodenfeuchte und Schneeschmelze untersucht (Abb. 9). Die Anpassung des Modells an die Daten zeigt, dass in Nordwesteuropa die Zunahme der Starkniederschläge die Hauptursache der zunehmenden Hochwasserwahrscheinlichkeiten ist (Beitrag von rd. 80 %), während die Zunahme der Bodenfeuchte eine geringere Rolle spielt. In Südeuropa ist die Verringerung der Bodenfeuchtigkeit aufgrund erhöhter Verdunstung der Hauptfaktor für die Abnahme der Hochwasser (Beitrag von 20 bis 80 %), während die Abnahme der Niederschläge eine etwas geringere Rolle spielt. In Osteuropa haben wärmere Temperaturen zu geringere Schneeschmelze und damit kleineren Schneeschmelze-Hochwassern geführt. Weder Starkniederschläge noch Veränderungen der Bodenfeuchte spielen hier eine relevante Rolle (KEMTER et al., 2020). HOFSTÄTTER & BLÖSCHL (2019) hoben die Bedeutung veränderter Vb-Zugbahnen hervor. Ergänzend dazu zeigte Teilprojekt 2 von SPATE (HAMOUDA et al., 2023), dass sich die multi-dekadische Variabilität von Regen-auf-Schnee-Ereignisse teilweise durch die Nordatlantische Oszillation und das Skandinavische Hochdruckmuster erklären lässt. Teilprojekt 4 des SPATE-Vorhabens zeigte, dass die hochwasserreichen Perioden in Europa stärker durch veränderte Abflussprozesse, als durch Veränderungen extremer Niederschläge hervorgerufen werden (TARASOVA & MERZ, 2023). Diese Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutung der Extremwerthydrologie. Sowohl bei der Schätzung der Hochwasser bestimmter Jährlichkeit, als auch der Analyse von deren Veränderungen, ist es essentiell, über die statistische Anpassung an das Datenkollektiv hinausgehend, die Abflussprozesse zu berücksichtigen. Als erster Schritt dafür hat sich seit Jahren die Untersuchung der Saisonalität der Hochwasser bewährt (BLÖSCHL et al., 1999; DWA, 2012; BLÖSCHL et al., 2017).

Die Beiträge zu den Hochwasseränderungen hängen auch von der Jährlichkeit ab (Abb. 10). In Nordwesteuropa nimmt der Beitrag der Extremniederschläge mit der Jährlichkeit geringfügig

ab. In Südeuropa nimmt der Beitrag der Bodenfeuchte wie zu erwarten ab, hingegen der Beitrag des Niederschlages zu. In Osteuropa ist der Beitrag der Schneeschmelze immer hoch. Insgesamt erklären die Auswertungen sehr gut die Änderungen der Häufigkeiten hochwasserreicher Perioden in Abbildung 6 und die Trends in Abbildung 7. In Nordwesteuropa (Region 1) sind die zunehmenden Niederschläge maßgebend; in Südeuropa (Region 2) die abnehmenden Niederschläge und die zunehmende Verdunstung; und in Osteuropa (Region 3) die abnehmende und frühere Schneeschmelze.

8 Schlussfolgerungen

Für die Ermittlung des Bemessungshochwassers ist es erforderlich, die Prozessursachen der Hochwasserentstehung und deren Änderungen zu kennen. Der vorliegende Beitrag wertet umfangreiche Hochwasserdaten in Europa aus, woraus sich die folgenden Schlussfolgerungen ergeben:

- In den letzten 500 Jahren gab es in Europa hochwasserreiche Perioden, die kälter waren als üblich. Die hochwasserreiche Periode der letzten 30 Jahre war jedoch deutlich wärmer.
- In den letzten 60 Jahren hat die Zahl der hochwasserreichen Perioden in Nordwesteuropa zugenommen, in Osteuropa und Teilen Südeuropas jedoch abgenommen.
- Die Zunahme der Hochwasser in Nordwesteuropa ist auf stärkere Niederschläge zurückzuführen, während in Südeuropa die geringere Bodenfeuchte und in Osteuropa die geringere Schneebedeckung für eine Abnahme der Hochwasser in mittleren und großen Gebieten verantwortlich sind.

Die Ergebnisse auf europäischer Ebene haben direkte Implikationen für die Ermittlung von Bemessungshochwassern auf lokaler Ebene, da das Klima ein räumlich relativ kohärenter Prozess ist. Zudem weisen die mit Klimamodellen weltweit für die nächsten

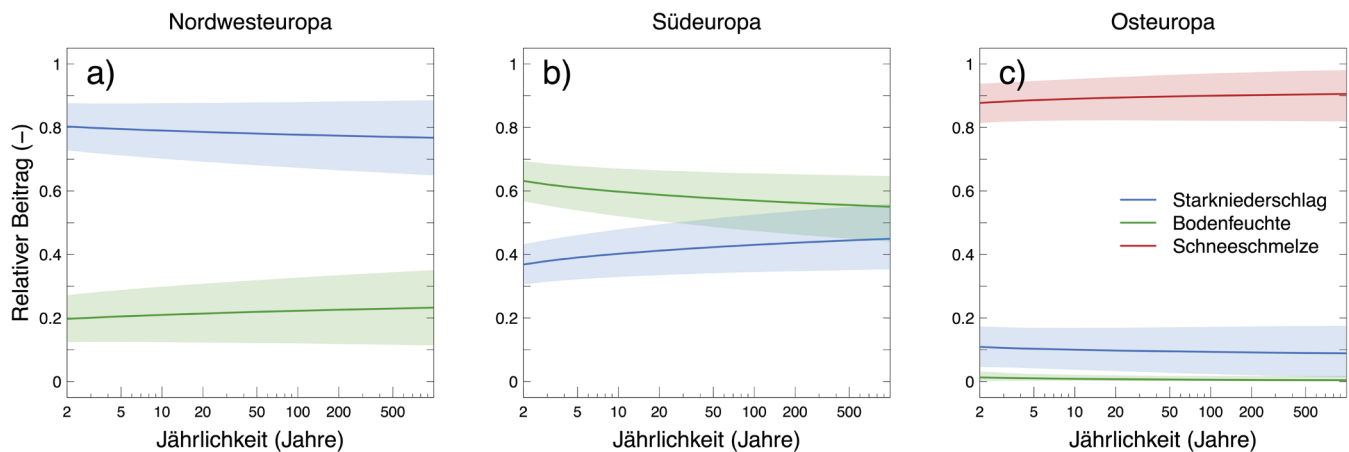


Abbildung 10

Relative Beiträge der Einflussfaktoren auf die beobachteten Hochwasseränderungen in Abhängigkeit von der Jährlichkeit im Zeitraum 1960 bis 2010 für drei Regionen in Europa. Die Linien und die schattierten Flächen stellen den Median bzw. die 90 %-Vertrauensbereiche dar für ein hypothetisches Einzugsgebiet von 1.000 km² (aus: BERTOLA et al., 2021).

Relative contributions of the drivers to observed flood changes as a function of the return period in the period 1960 to 2010 for three regions in Europe. The lines and shaded areas represent the median and 90 % confidence intervals, respectively, for a hypothetical catchment of 1.000 km² (from: BERTOLA et al., 2021).

Jahrzehnte prognostizierten Änderungen der Hochwasser große Ähnlichkeit mit den aus Abflussdaten der Vergangenheit abgeleiteten Veränderungen auf (MERZ et al., 2021). Wie dieser Artikel gezeigt hat, sind die Veränderungen der Hochwasser und ihre Ursachen nicht überall gleich. Dementsprechend erfordert auch die Anpassung an veränderte Klimabedingungen – sowohl aus Kosten- als auch aus Risikoüberlegungen – einen differenzierten Ansatz, anstatt gleiche Zuschläge überall einzuführen. Die Extremwerthydrologie (BLÖSCHL & MERZ, 2008; DWA, 2012) bietet dafür das geeignete Instrumentarium.

Conclusions

The estimation of design floods requires an understanding of the process causes of flood generation and their changes. This paper analyses an extensive flood data set in Europe and obtains the following conclusions:

- During the last 500 years, there existed flood-rich periods in Europe, which were colder than usual. However, the flood-rich period of the last 30 years has been significantly warmer.
- During the last 60 years, the number of flood-rich periods has increased in northwestern Europe, but decreased in eastern Europe and parts of southern Europe.
- The increase in flood magnitudes in northwestern Europe is related to rainfall increases, while lower soil moisture and less snow cover in southern and eastern Europe respectively have caused a decrease in flood magnitudes in medium and large catchments.

The results at the European scale have direct implications for estimating design floods at the local scale, as climate is a spatially rather coherent process. Moreover, the changes in floods pro-

jected by climate models around the world for the next decades show great similarity to those derived from past flood observations (MERZ et al., 2021). As this article has shown, flood changes and their causes are not the same everywhere. Accordingly, adaptation to changing climate conditions requires a differentiated approach – both for cost and risk reasons – instead of introducing the same allowance everywhere. Flood frequency hydrology (BLÖSCHL & MERZ, 2008; DWA, 2012) offers the appropriate approach for doing this.

Datenverfügbarkeit

Die hier dargestellten Ergebnisse sind den zitierten Publikationen entnommen, in denen die Datenverfügbarkeit erläutert ist.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschungsgruppe FOR 2416 (Space-Time Dynamics of Extreme Floods, SPATE) bzw. durch den Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF) unter Projektnummer I3174 und I4776. Zusätzlich wird dem FWF gedankt für die Finanzierung im Rahmen des Doktoratskollegs Wasserwirtschaftliche Systeme (W1219) und dem Europäischen Forschungsrat (ERC) im Rahmen des Advanced Grant FloodChange (Projekt 291152).

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Günter Blöschl
Dr. Miriam Bertola
Dr. David Lun
Dr. Andrea Kiss
Dr. Jürgen Komma
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie,
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
E-Mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Prof. Dr. Alberto Viglione
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente,
del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI),
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24, I-10129 Torino, Italia
E-Mail: alberto.viglione@polito.it

Literatur und Quellenverzeichnis

- AZEN, R. & D. V. BUDESCU (2003): The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression, *Psychol. Meth.*, 8, 129. <https://doi.org/10.1037/1082-989x.8.2.129>, 2003.
- BAN, N., J. SCHMIDL & C. SCHÄR (2015): Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1165–1172. <https://doi.org/10.1002/2014GL062588>.
- BARD, A., B. RENARD & M. LANG (2012): Floods in the Alpine areas of Europe, in: *Changes in Flood Risk in Europe*, edited by: Kundzewicz, Z. W., IAHS Press, Wallingford, UK, 362–371.
- BERTOLA, M. A. VIGLIONE, S. VOROGUSHYN, D. LUN, B. MERZ & G. BLÖSCHL (2021): Do small and large floods have the same drivers of change? A regional attribution analysis in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 1347–1364. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1347-2021>.
- BERTOLA, M., A. VIGLIONE, D. LUN, J. HALL & G. BLÖSCHL (2020): Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, pp. 1805–1822. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1805-2020>, 2020.
- BLÖSCHL, G. (2022a): Flood generation: process patterns from the rain-drop to the ocean, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 2469–2480. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2469-2022>.
- BLÖSCHL, G. (2022b): Three hypotheses on changing river flood hazards, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 5015–5033. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>.
- BLÖSCHL, G. & R. MERZ (2008): Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11) 12–18.
- BLÖSCHL, G., A. KISS, A. VIGLIONE et al. (2020): Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583 (7817), pp. 560–566. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>.
- BLÖSCHL, G., A. P. BLASCHKE, K. HASLINGER, M. HOFSTÄTTER, J. PARAJKA, J. SALINAS & W. SCHÖNER (2018): Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft - ein aktualisierter Statusbericht Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, pp. 462–473. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>.
- BLÖSCHL, G. et al. (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357 (6351) 588–590. DOI: 10.1126/science.aan2506.
- BLÖSCHL, G., J. HALL, A. VIGLIONE et al. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573 (7772), pp. 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.
- BLÖSCHL, G., T. NESTER, K. KOMMA, J. PARAJKA & R.A.P. PERDIGÃO (2013): The June 2013 flood in the Upper Danube Basin and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5197–5212. DOI:10.5194/hess-17-5197-2013.
- BLÖSCHL, G., U. PIOCK-ELLEN, R. MERZ & D. GUTKNECHT (1999): Prozeßorientierte Regionalisierung von Hochwässern. In: G. Koehler (Ed.) *Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete*. Tagungsband zum Kolloquium vom 4.-5. März 1999. Schriftenreihe des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Nr 9, S. 267–285.
- CORNES, R.C., G. VAN DER SCHRIER, E.J. VAN DEN BESSELAAR & P.D. JONES (2018): An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 123, 9391–9409.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Deutschland, August 2012, 90 Seiten.
- FATICHI, S., V.Y. IVANOV & E. CAPORALI (2012): Investigating interannual variability of precipitation at the global scale: Is there a connection with seasonality?, *J. Climate*, 25, 5512–5523.
- FOWLER, H.J., G. LENDERINK, A.F. PREIN et al. (2021): Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes, *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2, 107–122. <https://www.nature.com/articles/s43017-020-00128-6>.
- GLASER, R. (2013): *Klimageschichte Mitteleuropas: 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen* (Darmstadt Primus), 94.
- GLAZ, J., J. NAUS & S. WALLENSTEIN (2001): *Scan statistics*. New York, NY: Springer.
- HALL, J., B. ARHEIMER, G.T. ARONICA ... & G. BLÖSCHL (2015): A European Flood Database: facilitating comprehensive flood research beyond administrative boundaries, *P. Int. Ass. Hydrol. Sci.*, 370, 89–95, 2015.
- HALL, J., B. ARHEIMER, M. BORG, ... & G. BLÖSCHL (2014): Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2735–2772. DOI:10.5194/hess-18-2735-2014.
- HAMOUDA, M.E., CH. CZAKAY, C. PRIMO, A. HOFF, B. AHRENS (2023): Zu Atmosphärischen Ursachen für Extreme Hochwasserereignisse in Mitteleuropa. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, dieser Band.
- HOFSTÄTTER, M. & G. BLÖSCHL (2019): Vb cyclones synchronized with the Arctic-/North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 3259–3278.
- HURRELL, J.W., Y. KUSHNIR, G. OTTERSEN & M. VISBECK (2003): An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 134, 1–36. DOI: 10.1029/134GM01.
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- KEMTER, M., B. MERZ, N. MARWAN, S. VOROGUSHYN & G. BLÖSCHL (2020): Joint trends in flood magnitudes and spatial extents across Europe. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087464. <https://doi.org/10.1029/2020GL087464>.
- Kreibich, H., A.F. Van Loon, K. Schröter, P. J. Ward, ... G. Blöschl, G. Di Baldassarre (2022): The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, 608, 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>.
- Lun, D., A. Viglione, M. Bertola, J. Komma, J. Parajka, P. Valent & G. Blöschl (2021): Characteristics and process controls of statistical flood moments in Europe – a data based analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 5535–5560. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5535-2021>.
- LUN, D., S. FISCHER, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2020): Detecting flood-rich and flood-poor periods in annual peak discharges across Europe. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026575. DOI: 10.1029/2019WR026575
- MERZ, B., G. BLÖSCHL, S. VOROGUSHYN, F. DOTTORI, J.C.J.H. AERTS, P. BATES, M. BERTOLA, M. KEMTER, H. KREIBICH, U. LALL & E. MACDONALD (2021): Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 592–609.
- MERZ, B., V.D. NGUYEN & S. VOROGUSHYN (2016): Temporal clustering of floods in Germany: Do flood-rich and flood-poor periods exist?. *Journal of Hydrology*, 541, 824–838.

- MERZ, B., S. VOROGUSHYN, S., UHLEMANN, J. DELGADO & Y. HUNDE-CHA (2012): HESS opinions – more efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, 16, 1379–1387.
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2008): Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300–309.
- NICOLUSSI, K., U. JÖRIN, K.F. KAISER, G. PATZELT & A. THURNER (2006): Precisely dated glacier fluctuations in the Alps over the last four millennia. *Global Change in Mountain Regions*. Duncow, Sapiens, 59–60.
- PETROW, T. & B. MERZ (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *J. Hydrol.*, 371, 129–141. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.03.024.
- PETROW, T., J. ZIMMER & B. MERZ (2009): Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1409–1423.
- PFISTER, C. (2009): The ‘Disaster Gap’ of the 20th century and the loss of traditional disaster memory. *Gaia* 18, 239–246.
- ROGGER, M., M. AGNOLETTI, A. ALAQUI, J.C. BATHURST., G. BODNER, M. BORG, V. CHAPLOT, F. GALLART, G. GLATZEL, J. HALL, J. HILDEN, L. HOLKO, R. HORN, A. KISS, S. KOHNOVA, G. LEITINGER, B. LENNARTZ, J. PARAJKA, R. PERDIGÃO, S. PETH, L. PLAVCOVÁ, J.N. QUINTON, M. ROBINSON, J.L. SALINAS, A. SANTORO, J. SZOLGAY, S. TRON, J.J.H. VAN DEN AKKER, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2017): Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*, 53, 5209–5219. DOI:10.1002/2017WR020723.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., & F. NAEF (2010): More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 1–8.
- STEIROU, E.S., L. GERLITZ, H. APEL, X. SUN & B. MERZ (2019): Climate influences on flood probabilities across Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 1305–1322. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1305-2019>.
- SVENSSON, C., J. HANNAFORD, Z.W. KUNDZEWICZ & T.J. MARSH (2006): Trends in river floods: why is there no clear signal in observations?. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 305, 1–18.
- TARASOVA, L. & R. MERZ (2023): Großräumige Analyse von Abflussereignissen: Entstehungsprozesse und deren Effekt auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Abflusssdynamik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, dieser Band.
- VIGLIONE, A., R. MERZ & G. BLÖSCHL (2009): On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (5) 577 – 593.
- VIGLIONE, A., R. MERZ, J.S. SALINAS & G. BLÖSCHL (2013): Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis. *Water Resources Research*, 49. DOI:10.1029/2011WR010782.
- VOGT, J., P. SOILLE, A. DE JAGER, E. RIMAVICIUTE, W. MEHL, S. FOIS-NEAU, K. BODIS, J. DUSART, M. PARACCHINI & P. HAASTRUP (2007): A pan-European river and catchment database, European Commission [data set]. <https://doi.org/10.2788/35907>.
- VOROGUSHYN, S., H. APEL, M. KEMTER & A.H. THIEKEN (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 66, (5), 244–254. DOI: 10.5675/HyWa_2021.5_2.