

Sergiy Vorogushyn, Björn Guse, Elena Macdonald, Luzie Wietzke & Bruno Merz

Wie entstehen überraschende Extremhochwasser? Einflussfaktoren der *tail heaviness* bei Hochwasserverteilungen

How are surprising extreme floods generated? Factors affecting tail heaviness of flood distributions

Die verlässliche Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten bleibt eine wichtige Frage für die Wasserwirtschaft und das Hochwasserrisikomanagement. Dies wurde angesichts des letzten extremen und überraschenden Hochwassers im Juli 2021 in Westdeutschland wieder deutlich. Dieser Artikel fasst Ergebnisse des Teilprojekts 3 der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) zusammen. Das Teilprojekt untersuchte die Faktoren, die die Randschwere von Hochwasserverteilungen, die sogenannte *tail heaviness*, beeinflussen. Bei Verteilungen mit *heavy tail* haben extreme Ereignisse eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit als bei exponentiell abfallenden Verteilungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Hochwasserverteilungen in knapp zwei Dritteln der untersuchten Einzugsgebiete in Deutschland und Österreich *heavy tails* aufweisen, ebenso die Verteilungen von Starkniederschlägen an den meisten Klimastationen in Deutschland. Es wurden Ereignis- und Einzugsgebietsfaktoren identifiziert, die auf *heavy tails* der Hochwasserverteilungen hindeuten, auch wenn diese aus kurzen Abflusszeitreihen nicht verlässlich bestimmt werden können. Schließlich zeigte die Untersuchung an insgesamt 37 Mündungen von Flüssen in Deutschland, dass die Überlagerung von Hochwasserwellen kein maßgeblicher Mechanismus der Entstehung von *heavy-tail*-Verteilungen an deutschen Flüssen ist.

Schlagwörter: Hochwasserverteilungen, Niederschlagsverteilungen, *heavy tails*, Hochwasserwellenüberlagerung, Bemessung

The reliable determination of flood probabilities remains an important issue for water management and flood risk management. This has become evident again in light of the last extreme and surprising flood in July 2021 in western Germany. This article summarizes results of subproject 3 of the DFG research group SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods), which investigated the factors influencing the tail heaviness of flood distributions. For heavy-tailed distributions the occurrence of extreme events is more likely than for exponentially receding distributions. The results show that flood distributions in nearly two-thirds of the studied catchments in Germany and Austria exhibit heavy tails, as do heavy precipitation distributions at most climate stations in Germany. Event and catchment factors were identified that indicate a potential for heavy tails of flood distributions, even if these cannot be reliably determined from short runoff time series. Finally, the study of 37 river confluences in Germany showed that flood wave superposition is not a significant mechanism in the formation of heavy-tailed distributions at German rivers.

Keywords: Flood distributions, precipitation distributions, heavy tails, flood wave superposition, flood design values

1 Einleitung

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Hochwasserabflüssen und Niederschlägen können sogenannte schwere Ränder (engl. *heavy tails*) aufweisen. Im Weiteren wird der geläufige englische Begriff *heavy tail* (bzw. *light tail*) verwendet. Die Wahrscheinlichkeiten einer Verteilungsfunktion mit einem *heavy tail* gehen im Extrapolationsbereich der Höchstwerte langsamer gegen Null als dies bei einem exponentiellen Rückgang zu erwarten wäre (EL ADLOUNI et al., 2008), so die formelle Definition. Betrachtet man das Integral der rechten Seite der Verteilung, so ergibt sich eine höhere "Masse" als bei einer Verteilung mit exponentiellem Rückgang – der rechte Rand ist somit "schwer". Daher ist bei der Anpassung einer Verteilungsfunktion an die Stichprobe der Hochwasserbeobachtungen die Verwendung einer Verteilung mit schwerem rechtem Rand erforderlich, wenn im Bereich geringer Überschreitungswahrscheinlichkeiten viele, zum übrigen Verlauf der Verteilung scheinbar unpassend hohe Werte beobachtet wurden. Je größer diese Extremwerte sind, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Stichprobe auch in Zukunft ein oder mehrere unverhältnismäßig hohe Beobachtungswerte auftreten. Bei Verteilungen mit *heavy tail* sind sehr große Ereignisse, die mitunter bisherige Ereignisse deutlich übersteigen, wahrscheinlicher als bei Verteilungen mit *light tail*. In der Hydrologie werden häufig Verteilungen mit *light tail* wie

zum Beispiel die Gumbel-Verteilung verwendet. Da Menschen intuitiv eher ein Verhalten erwarten, das durch Verteilungen mit *light tails* beschrieben wird, besitzen *heavy tails* ein großes Überraschungspotenzial (TALEB, 2007). Solche "überraschenden" Ereignisse können zu sehr großen Schäden führen (MERZ et al., 2015) und stellen eine besondere Herausforderung für das Hochwassermanagement dar (KREIBICH et al., 2022). Die jüngste Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 in Rheinland-Pfalz sowie in Nordrhein-Westfalen mit über 180 Toten und den bisher höchsten wirtschaftlichen Schäden durch eine Naturkatastrophe in Deutschland¹ ist ein trauriges Beispiel für diesen Zusammenhang zwischen hohen Schäden und Verteilungen mit einem *heavy tail*, da aufgrund der Hochwasserereignisse bis 2020 *tail heaviness* unterschätzt wurde (VOROGUSHYN et al., 2022).

Verteilungen können unterschiedlich stark ausgeprägte *heavy tails* aufweisen. Das Maß der *tail heaviness* kann durch verschiedene Ansätze beschrieben werden. WIETZKE et al. (2020) analysierten eine Reihe von Indikatoren hierfür: den Shape-Parameter (ξ) der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV), den Gini Index, den Obesity Index und das Upper Tail Ratio (UTR). Sie

¹ <https://www.munichre.com/de/unternehmen/media-relations/medieninformationen-und-unternehmensnachrichten/medieninformationen/2022/bilanz-naturkatastrophen-2021.html>

untersuchten statistische Eigenschaften dieser Indikatoren wie die Sensitivität gegenüber Stichprobenlänge, -mittelwert und -streuung sowie gegenüber Ausreißern. Der GEV Shape-Parameter ist im Unterschied zu den anderen Indikatoren direkt mit der formellen Definition der *tail heaviness* verbunden. Positive Werte des Shape-Parameters beschreiben eine Verteilung mit einem *heavy tail*, wogegen die Gumbel-Verteilung ($\xi = 0$) einem *light tail* entspricht und negative Werte eine nach oben begrenzte Verteilung darstellen. Der Shape-Parameter weist akzeptable Sensitivitätscharakteristika auf und gewährleistet auch eine gute Vergleichbarkeit zwischen Zeitreihen unterschiedlicher Länge (WIETZKE et al., 2020). Der Indikator setzt allerdings eine Verteilung, nämlich die GEV, voraus. Diese hat sich jedoch als flexibel und passend sowohl für Abfluss- als auch für Niederschlagsmaxima bewährt (VILLARINI & SMITH, 2010; PAPALEXIOU & KOUTSOYIANNIS, 2013).

Die *tail heaviness* von Hochwasserverteilungen wird durch eine Reihe von Einflussfaktoren bestimmt. Basierend auf einer umfassenden Literaturanalyse formulierten MERZ et al. (2022) neun Hypothesen darüber, wie Faktoren der Atmosphäre, des Einzugsgebiets und des Gewässernetzes die *tail heaviness* beeinflussen (Tab. 1). Die Beziehungen zwischen den neun Hypothesen sind in Abbildung 1 gezeigt. Die drei Hypothesen, die mit dem Gewässernetz verbunden sind (H7-H9), und H4 zur Nichtlinearität der Abflussbildung beeinflussen direkt den rechten Rand der Hochwasserverteilungen. Alle anderen Einflüsse wirken indirekt über die Abflussbildung, die somit eine besondere und wichtige Rolle spielt.

Dieser Artikel fasst Ergebnisse des Teilprojekts 3 der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) zusammen. Teilprojekt 3 untersucht die Faktoren, die den rech-

Tabelle 1
Hypothesen zur Entstehung von *heavy tails* bei Hochwasserverteilungen (HQ-Verteilungen). Die Hypothesen und Hauptergebnisse sind verkürzt zusammengefasst. Die Hauptergebnisse sind in drei Kategorien hinsichtlich ihrer Belastbarkeit basierend auf der Literaturanalyse unterteilt und entsprechend eingefärbt: belastbar (dunkelblau), mittel belastbar (blau), begrenzt belastbar (hellblau). Für eine detaillierte Darstellung siehe MERZ et al. (2022).
Hypotheses for the emergence of heavy tails of flood distributions. The hypotheses and main findings are shortened. The main results are classified into three categories according to the degree of evidence based on the literature review: robust (dark blue), medium (blue), limited (light blue). For detailed explanations, see MERZ et al. (2022).

Hypothese	Hauptergebnisse
H1 – <i>Heavy tails</i> von HQ-Verteilungen resultieren aus <i>heavy tails</i> von Niederschlagsverteilungen.	Die <i>tail heaviness</i> des Niederschlags ist nicht der dominierende Faktor; bei gegebenen Niederschlagseigenschaften ist ein breites Spektrum der <i>tail heaviness</i> von HQ-Verteilungen möglich. Bei sehr hohen Wiederkehrperioden verringert sich der Einfluss von Einzugsgebiets- und Gewässerfaktoren und der rechte Rand der HQ-Verteilung wird durch den Niederschlag dominiert.
H2 – Der Prozess der Hochwasserentstehung (z. B. Schneeschmelze oder Regenhochwasser) prägt den rechten Rand der HQ-Verteilung.	Gebiete mit Hochwassern durch Schneeschmelze weisen eher <i>light tails</i> auf als Gebiete mit regenbedingten Hochwassern.
H3 – Das Auftreten von mehreren Hochwassertypen in einem Einzugsgebiet führt zu <i>heavy tails</i> von HQ-Verteilungen.	Kann durch 2 Effekte wirken: (1) Wenn ein Hochwassertyp einen <i>heavy tail</i> besitzt, so neigt die Mischverteilung ebenfalls zu einem <i>heavy tail</i> . (2) Wenn ein Hochwassertyp selten auftritt, aber sehr hohe Scheitelwerte hat, kann die Mischverteilung einen <i>heavy tail</i> haben, selbst wenn die Verteilungen der einzelnen Hochwassertypen einen <i>light tail</i> zeigen.
H4 – Eine nichtlineare Reaktion des Einzugsgebiets auf den Niederschlag erzeugt einen <i>heavy tail</i> der HQ-Verteilung.	Die Reaktion des Einzugsgebiets spielt eine wichtige Rolle bei der Entstehung von <i>heavy tails</i> bei HQ-Verteilungen. Nichtlinearitäten in der Abflussbildung, z. B. wenn ein Speicher-Schwellenwert überschritten wird und Oberflächenabfluss entsteht, begünstigen sprunghafte Veränderungen in der Hochwasserhäufigkeitskurve und <i>heavy tails</i> .
H5 – Trockener Gebiete (im globalen aber auch regionalen Vergleich) zeigen stärkere <i>heavy tails</i> bei HQ-Verteilungen.	In trockeneren Gebieten trifft der Ereignisniederschlag auf ein breiteres Spektrum von Anfangsbedingungen, die noch dazu eine schiefe Verteilung aufweisen, was zu sehr unterschiedlichen Abflussbeiwerten führt.
H6 – Kleinere Einzugsgebiete haben stärkere <i>heavy tails</i> bei HQ-Verteilungen.	Die räumliche Aggregation von Niederschlag und Abflussbildung in größeren Einzugsgebieten dürfte zu weniger starken <i>heavy tails</i> bei HQ-Verteilungen beitragen. Der unterschiedliche Einfluss von Prozessen der Hochwasserentstehung mit zunehmender Gebietsgröße dürfte allerdings eine klare Relation der <i>tail heaviness</i> von HQ-Verteilungen mit der Einzugsgebietsgröße verhindern.
H7 – Der Bau von Talsperren führt zu stärkeren <i>heavy tails</i> von HQ-Verteilungen.	Talsperren reduzieren kleine Hochwasser deutlich, aber nicht extreme Hochwasser. Dies kann zu einem stärkeren <i>heavy tail</i> der HQ-Verteilung im Vergleich zum ursprünglichen Zustand (ohne Talsperren) führen.
H8 – Deichbau erhöht die <i>tail heaviness</i> von HQ-Verteilungen bis zum Deichbruch.	Vernachlässigung von Deichbrüchen bei der Hochwasserhäufigkeitsanalyse, was typischerweise der Fall ist, kann zur Überschätzung der <i>tail heaviness</i> von HQ-Verteilungen führen.
H9 – Unterhalb von Zusammenflüssen zeigen HQ-Verteilungen <i>heavy tails</i> .	Es gibt keine Hinweise, dass die Überlagerung von Hochwasserwellen an Zusammenflüssen die <i>tail heaviness</i> verstärkt. Dies wäre nur zu erwarten, wenn sich die Spitzen von großen Hochwässern überlagern würden, aber nicht die Spitzen von kleinen Ereignissen.

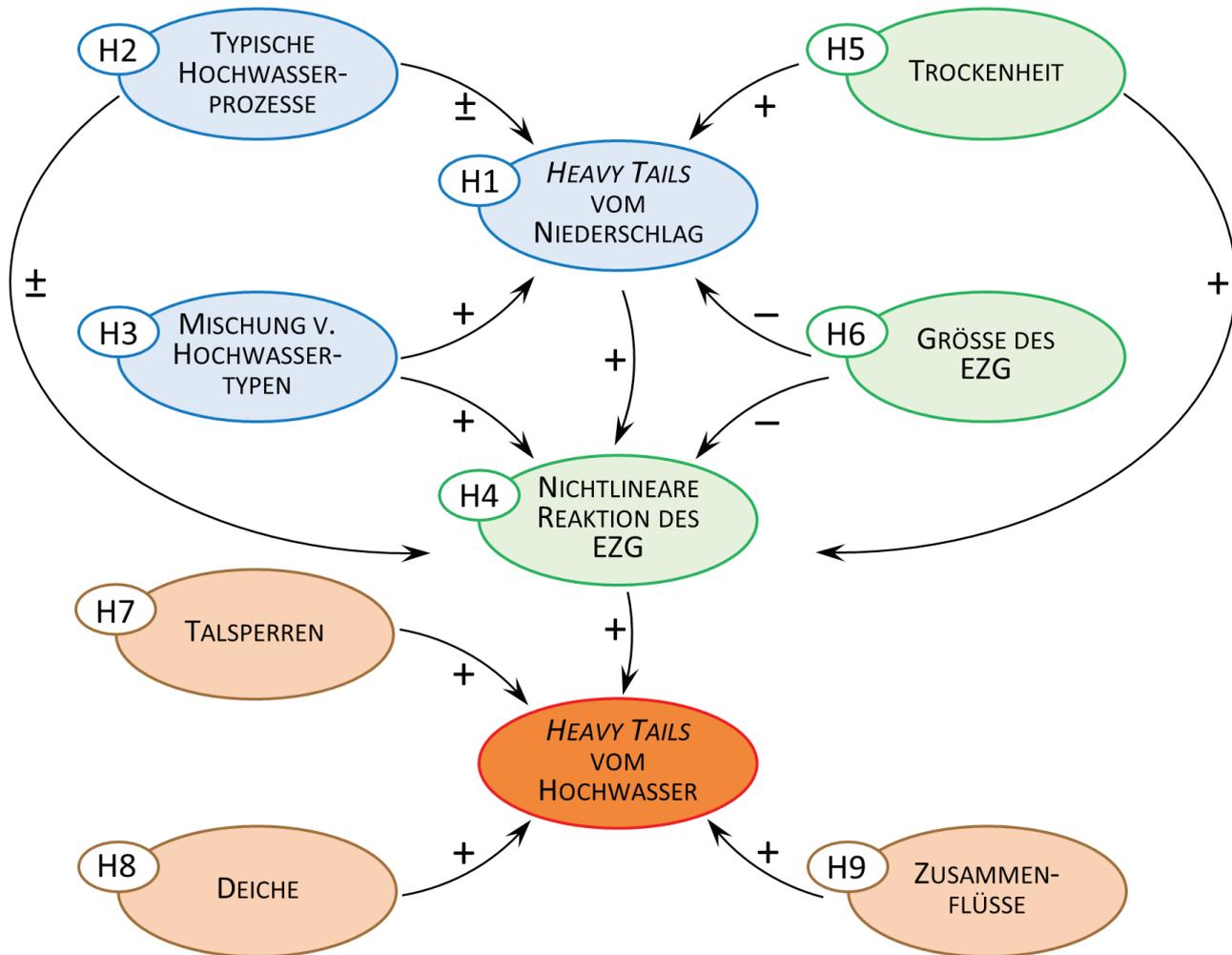


Abbildung 1

Beziehungen zwischen den neun Hypothesen (Tab. 1) und heavy tails von Hochwasserverteilungen (nach MERZ et al., 2022). +/- Pfeile zeigen positive/negative Ursachen-Wirkungsbeziehungen an. ± zeigt einen Einfluss, der sowohl positiv als auch negativ wirken kann. Die Farben kennzeichnen die Kompartimente Atmosphäre (blau), Einzugsgebiet (grün) und Gewässernetz (braun).
Relations between the nine hypotheses (Tab. 1) and heavy tails of flood distributions (adapted from MERZ et al., 2022). +/- arrows represent positive/negative cause-effect relations. ± represents an effect that can work positively or negatively. Colors denote the compartments atmosphere (blue), catchment (green) and river network (brown).

ten Rand von Hochwasserverteilungen beeinflussen. Es werden in diesem Artikel drei Hypothesen in folgender Reihenfolge betrachtet: H4 (nichtlineare Abflussbildung), H1 (heavy tails der Verteilungen von Starkniederschlägen) und H9 (Zusammenflüsse). In anderen Teilprojekten der Forschungsgruppe SPATE wurden auch Beiträge zur Analyse weiterer Hypothesen geleistet. So fanden WANG et al. (2023) im Teilprojekt 4 im Hinblick auf die Hypothese H6, dass kleinere Einzugsgebiete eine geringere Resilienz haben, um die räumliche Heterogenität von Starkniederschlägen abzupuffern. Dies führt zu stärkeren heavy tails der Hochwasserverteilungen in kleinen Einzugsgebieten. Diese Resilienz hängt mit der räumlichen Anordnung und Länge des Gewässernetzes zusammen. So kommt es in großen Einzugsgebieten häufiger vor, dass die Hochwasser in den Vorflutern auf geringere Abflüsse aus weniger betroffenen Quelleinzugsgebieten treffen und dadurch die Extreme am Auslass verhältnismäßig geringer ausfallen als in kleineren Gebieten. Die Form der Einzugsgebiete hat ebenfalls einen Einfluss: lang gezogene

Gebiete zeigen eine stärkere Neigung zu heavy tails als kreisförmigere Gebiete. Im Prinzip bestimmen das Verhältnis von räumlicher Niederschlagsausdehnung zu Einzugsgebietsgröße bzw. die Interaktion von Regenzugbahn und der Einzugsgebietsform wie stark und wie oft mehrere Teileinzugsgebiete von Extremen betroffen sind. Je größer das Einzugsgebiet, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass alle Teileinzugsgebiete ähnlich stark vom Niederschlag betroffen werden. In den Teilprojekten 1 und 4 wurde außerdem gezeigt, dass bei vielen Pegeln in Deutschland die rechten Ränder der Hochwasserverteilungen von Hochwasserprozessen dominiert sind, die im restlichen Teil der Verteilungen deutlich seltener auftreten (FISCHER et al., 2020; TARASOVA et al., 2020). Zwar wurde die tail heaviness in diesen Arbeiten nicht quantifiziert, beide Studien zeigten jedoch, dass in vielen Einzugsgebieten große Hochwasser durch andere Prozesse hervorgerufen werden können als kleinere Hochwasser. Das lässt deshalb die Möglichkeit offen, dass die Mischung von Hochwassertypen zu tail heaviness beitragen kann (H3).

Ein wesentliches Ziel des Teilprojektes 3 war es, die Faktoren und Prozesse zu identifizieren, die die *tail heaviness* bestimmen, und ihren Einfluss quantitativ zu erfassen. Aufgrund der kurzen Reihenlänge verfügbarer Hochwasserbeobachtungen kann die *tail heaviness* einer einzelnen Hochwasserverteilung nicht immer belastbar aus der gegebenen Stichprobe abgeschätzt werden. WIETZKE et al. (2020) zeigten in einem stochastischen Monte-Carlo Experiment, dass die abgeschätzten GEV Shape-Parameter einer Stichprobe erhebliche Streuung aufweisen. Die Stichproben wurden aus einer Verteilung mit einem festgelegten Shape-Parameter generiert. Obwohl der Median bei der Stichprobenlänge von 50 Jahren relativ nah an den festgelegten Shape-Parameter kommt, kann der Shape-Parameter einer zufälligen Realisation, so wie einer gemessenen Abflussreihe, erheblich davon abweichen. Durch die Analyse von sehr vielen Einzugsgebieten können jedoch Einflussfaktoren, die für die Entstehung von *heavy tails* von Bedeutung sind, identifiziert werden. Bei der Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten bzw. Bemessungsgrößen können die in diesem Beitrag vorgestellten Faktoren, die *tail heaviness* begünstigen, im betrachteten Einzugsgebiet eine Rolle spielen und sollten gegebenenfalls in dem Ansatz der "Extremwerthydrologie" berücksichtigt werden (MERZ & BLÖSCHL, 2008A; MERZ & BLÖSCHL, 2008B; VIGLIONE et al., 2013). Der Ansatz der "Extremwerthydrologie" ist in dem DWA-Merkblatt 552 (DWA, 2012) verankert. Der Ansatz basiert auf einer zeitlichen, räumlichen und kausalen Informationserweiterung im Vergleich zur traditionellen Extremwertstatistik bei der Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten.

2 Daten und Methoden

Für die Überprüfung der Hypothesen wurde eine große Anzahl gemessener meteorologischer und hydrologischer Datensätze verwendet, die durch modellierte Datensätze ergänzt wurden. Tägliche Abflusszeitreihen an über 450 Pegeln in Deutschland und Österreich mit mindestens 50 Jahren Beobachtungszeitraum ab dem Jahr 1951 wurden von Hydrologischen Diensten der Bundesländer und durch den Hydrographischen Dienst Österreichs bereitgestellt. Die Einzugsgebiete zu den Pegeln wurden basierend auf dem EU-DGM mit einer Auflösung von 25 x 25 m ermittelt und variieren zwischen 11 und knapp 160.000 km². Pegel mit einem starken Einfluss von Stauseen/Reservoirs wurden aus der Analyse nach einem anfänglichen Screening ausgeschlossen.

Für die Analyse der *tail heaviness* des Niederschlags wurden die gemessenen täglichen Niederschlagssummen an über 640 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Um den Einfluss des Niederschlags auf die Abflussbildung zu untersuchen, wurde der interpolierte E-OBS-Datensatz mit 0.25° x 0.25° Auflösung (HAYLOCK et al., 2008) verwendet. Basierend darauf wurde der Gebietsniederschlag ermittelt, der dem jeweiligen Abflusspegel zugeordnet wurde. Die mittlere relative Bodenfeuchte in den Einzugsgebieten wurde aus dem hydrologischen Modell mHM (SAMANIEGO et al., 2010), angetrieben mit dem E-OBS-Datensatz, extrahiert. Die Schneeschmelze und die spezifischen Parameter zur Beschreibung des Konvektionspotenzials der Atmosphäre – potenzielle konvektive Energie (CAPE) und Konvektionshemmung (CIN) – wurden aus dem hochaufgelösten Reanalyse-Datensatz 4DAS (PRIMO et al., 2019; HAMOUDA et al., DIESE HYWA-AUSGABE, TEILPROJEKT 2) gewonnen. CAPE und

CIN wurden für die Bestimmung der Niederschlagsart – stratiform oder konvektiv – verwendet wie von KEMTER et al. (2020) vorgeschlagen. Dabei wurde angenommen, dass das Niederschlagsereignis konvektiv ist, wenn CAPE > 400 J/kg und CIN < 5 J/kg für mehr als 25 % der Einzugsgebietsfläche an mindestens einem Ereignistag sind.

Um die Hypothese H4 und H1 zu testen, wurden die Generalisierte Extremwertverteilung an die jährlichen Maxima der gemessenen Abfluss- und Niederschlagszeitreihen mit der L-Momenten-Methode angepasst und die Shape-Parameter bestimmt. Aus diesen Zeitreihen und weiteren Beobachtungs- und Modellierungsdaten wurden insgesamt 34 Ereignis- und Einzugsgebietsindikatoren gewonnen (MACDONALD et al., 2022). So wurde zum Beispiel der Ereignisniederschlag als mehrtägige Niederschlagssumme vor dem maximalen Jahresabfluss ab dem ersten nassen Tag bestimmt. Die maximale Dauer der Ereignisniederschläge variiert mit der Einzugsgebietsgröße zwischen ein bis zwei Tagen in kleinsten Gebieten bis zu etwa drei Wochen in sehr großen Gebieten wie z. B. Rhein. Weitere Indikatoren beschreiben unter anderem den Feuchtezustand eines Einzugsgebiets vor einem Ereignis, die Reaktion eines Einzugsgebiets während eines Ereignisses und die Größe eines Einzugsgebiets. Die Reaktion eines Einzugsgebiets wird durch den Abflussbeiwert und der sogenannten Ereigniszeitskala (event time scale) charakterisiert. Ereigniszeitskala ist definiert als das Verhältnis des Volumens des Direktabflusses (nach Abzug des Basisabflusses) zur Direktabflussspitze eines Ereignisses (GAAL et al., 2012). Diese Indikatoren weisen jeweils eine Korrelation mit dem Shape-Parameter der Hochwasserverteilung auf und kommen als potenzielle Prädiktoren der *tail heaviness* infrage. Die Zusammenhänge zwischen *tail heaviness* und den Prädiktoren wurden mittels Multipler Linearer Regression und der Random Forest-Methode untersucht. Bei Random Forest handelt es sich um ein Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Dabei wird die Vorhersage einer Größe aus der Kombination von Ergebnissen einer Vielzahl von sogenannten Entscheidungs- oder Regressionsbäumen abgeleitet. Die einzelnen Regressionsbäume werden mittels eines Bootstrap-Verfahrens aus den Teildatensätzen der Prädiktoren ermittelt. Weitere Details zu den Prädiktoren und der Methodenbeschreibung sind in MACDONALD et al. (2022) zusammengefasst.

Die Hypothese zur Rolle von Zusammenflüssen auf *heavy tails* (H9) wurde anhand 37 Zusammenflüssen bzw. sogenannte Dreier-Punkte analysiert. Diese beinhalten die Pegel-Zeitreihen an einem Hauptstrom oberhalb und unterhalb eines Zusammenflusses, sowie am Zufluss in unmittelbarer Nähe der Mündung. Dabei wurden die Zeitreihen so ausgewählt, dass sie eine Mindestlänge von 30 Jahren aufweisen und die Einzugsgebiete mindestens 500 km² groß sind. Die maximalen jährlichen Abflussspitzen im Unterlauf wurden ermittelt und die entsprechenden Abflussspitzen an Hauptstrom- und Zufluss-Pegeln im Oberlauf selektiert. Die letzteren sind nicht unbedingt die maximalen jährlichen Abflüsse an den jeweiligen Pegeln. Anschließend wurde der Zeitversatz zwischen den Abflussspitzen an den drei Pegeln für alle 37 Zusammenflüsse berechnet. Die Häufigkeitsverteilung dieses Versatzes sowie der Versatz bei den 10 größten Hochwassern an jedem Zusammenfluss wurden gemeinsam analysiert. Weitere Details zum methodischen Vorgehen sind in GUSE et al. (2020) zusammengefasst.

3 Ergebnisse

3.1 Räumliche Verteilung von GEV Shape-Parametern der Hochwasser- und Niederschlagsverteilungen

Knapp zwei Drittel der Hochwasserzeitreihen in Deutschland und Österreich weisen positive GEV Shape-Parameter und damit *heavy-tail*-Verhalten auf (Abb. 2a). Vor allem im Erzgebirge, im Weser-Einzugsgebiet, am Alpenrand und in ganz Österreich sind positive Werte zu verzeichnen. Auch der überwiegende Teil (> 80 %) der täglichen Niederschlagszeitreihen in Deutschland weist *heavy tails* auf (Abb. 2b). Teilweise decken sich die Gebiete mit *heavy tails* beim Abfluss und beim Niederschlag, wie z. B. im Erzgebirge und in den oberen Zuflüssen von Weser und Donau. Die größten Shape-Parameter beim Niederschlag wurden an der Ostseeküste in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern festgestellt, wo es allerdings aufgrund der flachen Topographie kaum zu massiven Flusshochwassern kommt. In einigen Einzugsgebieten mit *heavy tails* beim Hochwasser weisen die Niederschlagsverteilungen *light tails* auf, wie z. B. im Schwarzwald. Allerdings ist dies nicht besonders ausgeprägt. Insgesamt deuten die Ergebnisse auf ein Wechselspiel zwischen Niederschlag- und Abflussbildungsprozessen hin, wie bereits das Einflussdiagramm in Abbildung 2 zeigt. Dieses Wechselspiel wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

3.2 Einflussfaktoren von *heavy tails* der Niederschlags- und Hochwasserverteilungen (H1 und H4)

Die Analyse der Anteile an stratiformen und konvektiven Niederschlägen in den beobachteten jährlichen Maximalniederschlägen deutet auf einen Einfluss der Niederschlagsart auf die *tail heaviness* hin. Betrachtet man die beiden Niederschlagsarten getrennt voneinander – also nur stratiform oder nur konvektiv – weisen sie jeweils sowohl *light* als auch *heavy tails* auf. Jede Klimastation weist jedoch eine Mischung von Niederschlagsarten

auf und die relativen Anteile der Niederschlagsarten können die *tail heaviness* beeinflussen. Die täglichen Niederschlagssummen bei konvektiven Niederschlägen fallen im *tail* oft höher aus als bei stratiformen Niederschlägen. So kommt es bei den Mischverteilungen, die einen höheren Anteil an konvektiven Ereignissen im *tail* der Verteilung haben, tendenziell zu etwas höheren Shape-Parametern (Abb. 3). Die Unterschiede zwischen den Stationen mit eher *light tails* (Shape ≤ 0.02) und den Stationen mit *heavy tails* (Shape > 0.18) sind jedoch nicht signifikant (Abb. 3).

Die Hochwasserverteilungen in Deutschland und Österreich weisen eine große Spannweite an Shape-Parametern auf (Abb. 2). Die Analyse von einer Vielzahl von Ereignis- und Gebietsprädiktoren mittels Multipler Linearer Regression zeigt, dass man mit einem linearen Modell fast 60 % der Varianz (Kreuzvalidierter $R^2 = 0,569$) in den ermittelten Shape-Parametern erklären kann (Abb. 4a). Bei der Analyse wurden viele verschiedene Kombinationen von Prädiktoren und somit viele verschiedene lineare Modelle ausgewertet. Vor allem die Prädiktoren, die die Abflussbildung beschreiben, sind entscheidende Einflussfaktoren auf die *tail heaviness* der Hochwasserverteilungen in Deutschland und Österreich (Abb. 4b) (MACDONALD et al., 2022). Ebenfalls von großer Bedeutung sind Niederschlagscharakteristika, die Saisonalität von Hochwasserereignissen und die Einzugsgebietsgröße (MACDONALD et al., 2022). Um die Rolle einzelner Prozesse zu verstehen, lohnt sich der Blick auf die wichtigsten Prädiktoren, deren Anteil an erklärter Varianz in Abbildung 4b dargestellt ist. Die Zusammenhänge zwischen den Ereignis- und Gebietscharakteristika und der *tail heaviness* der Hochwasserverteilungen sind schematisch in Abbildung 5 zusammengefasst.

MACDONALD et al. (2022) hatte die Ereigniszeitskala (EZS) als wichtigsten Faktor bei der Entstehung von *heavy tails* bei Hochwassern identifiziert. Je kleiner der EZS-Wert, desto höher ist

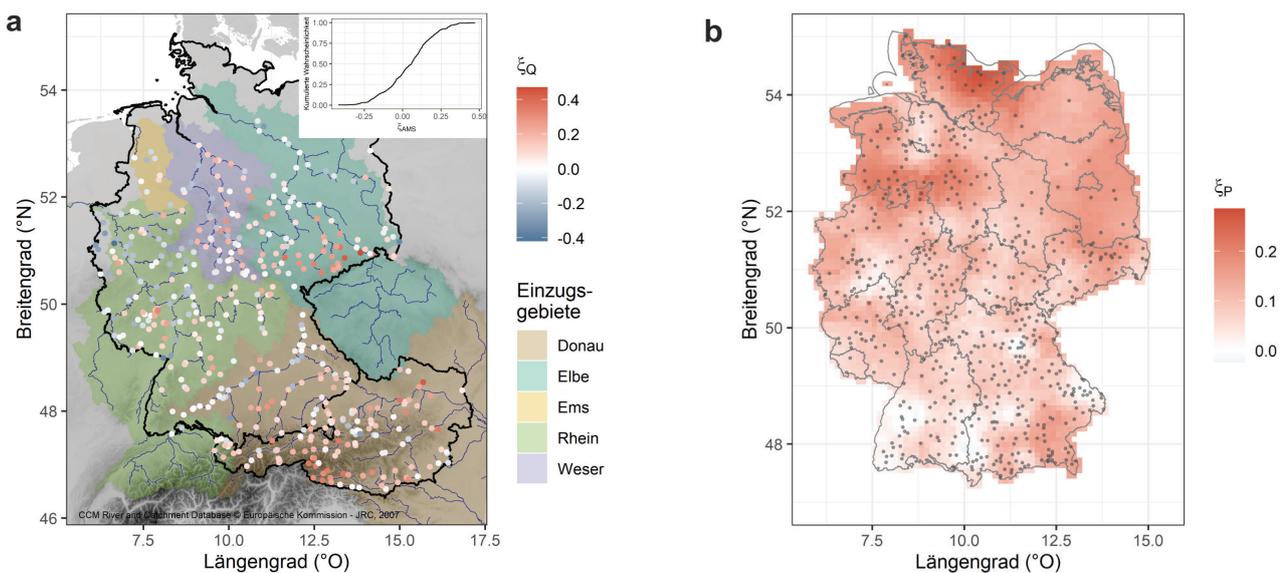


Abbildung 2

Räumliche Verteilung von (a) Shape-Parametern von Hochwasserverteilungen an Pegeln in Deutschland und Österreich und (b) Shape-Parametern von Niederschlagsverteilungen an Klimastationen (schwarze Punkte) in Deutschland, interpoliert mit der inversen Distanzgewichtung (IDW). Ein Shape-Parameter > 0 bedeutet *heavy tail*.

Spatial distribution of (a) shape parameter of flood peak distributions at gauges in Germany and Austria and (b) shape parameter of precipitation distributions at climate stations in Germany, interpolated with inverse distance weighting (IDW). A shape parameter > 0 indicates heavy tails.

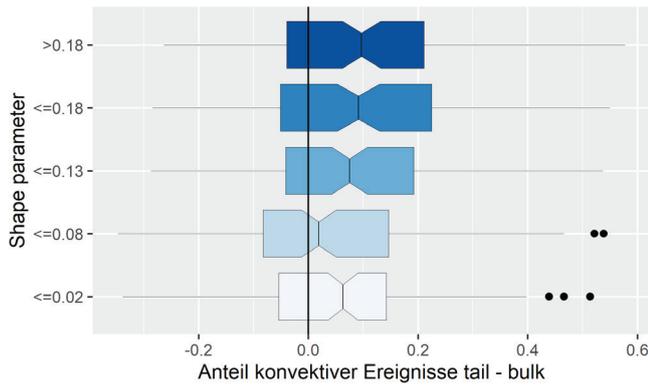


Abbildung 3 GEV Shape-Parameter von Niederschlagsverteilungen in Abhängigkeit des Anteils von konvektiven Niederschlagsereignissen im *tail* der Verteilungen (die größten 10 % der jährlichen maximalen täglichen Niederschläge) im Vergleich zum Anteil von konvektiven Niederschlagsereignissen im restlichen Teil der Verteilung (*bulk*, 90 % der Niederschläge). *GEV shape parameters of precipitation distributions depending on the share of convective precipitation events in the tail of the distributions (upper 10% of annual maximum daily precipitation) compared to the share of convective precipitation events in the remaining part of the distribution (bulk, lower 90% of precipitation).*

der Scheitelwert für ein gegebenes Volumen des Direktabflusses und desto schneller reagiert das Einzugsgebiet. Die Daten der vorliegenden Analyse zeigen, dass Einzugsgebiete höhere Shape-Parameter aufweisen, wenn größere Ereignisse geringere EZS-Werte zeigen, d. h. wenn größere Ereignisse mit einer schnelleren Abflusskonzentration verbunden sind (Abb. 5). An der zweiten und dritten Stelle der wichtigsten Einflussfaktoren auf die *tail heaviness* rangieren der Abflussbeiwert (AB) und das Niederschlagsvolumen (Pvol) (Abb. 4b). Der Shape-Parameter ist tendenziell größer für die Pegel, bei denen der Abflussbeiwert von größeren Ereignissen deutlich höher ist als bei kleineren

Ereignissen. Das deutet auf die Nichtlinearität der Abflussbildung und die Überschreitung von Bodenspeichern hin. Der gleiche Zusammenhang mit dem Shape-Parameter gilt auch für das Niederschlagsvolumen.

Um die oben beschriebenen Unterschiede in Werten von EZS, AB und Pvol zwischen großen und kleinen Ereignissen abzubilden, wurde ein neuer Prädiktor für den Shape-Parameter der Hochwasserverteilung entwickelt: die Steigung der linearen Regression von EZS, AB und Pvol gegen die Wiederkehrperioden von Hochwasserereignissen. Die Regressionen wurden dabei einzeln für jeden Pegel angepasst. Die Wiederkehrperioden wurden dabei aus empirischen Verteilungen mittels der Weibull-Formel bestimmt.

In Deutschland und Österreich spielt auch die Hochwassersaisonalität eine Rolle für die *tail heaviness*. Die Pegel, die von Sommerhochwassern dominiert werden, weisen stärkere *heavy tails* auf. Das deutet auf den Zusammenhang mit den *heavy tails* von Niederschlägen und der Rolle der konvektiven Ereignisse hin: Konvektiver Niederschlag tritt überwiegend im Sommer auf. Auch FISCHER et al. (2016) zeigten, dass die Sommerhochwasser für einige Pegel im Mulde-Einzugsgebiet deutlich höhere Shape-Parameter haben als Winterhochwasser. Das resultiert auch in den *heavy tails* der Verteilungen der gemischten Stichproben. In dieser Region weisen die Verteilungen maximaler täglicher Niederschläge ebenfalls *heavy tails* auf (Abb. 2b), was die Hypothese H1 stützt. Diese Hypothese wird in laufenden Arbeiten mit einem modellbasierten Ansatz detailliert untersucht. Nachgeordnet spielt auch die Größe der Einzugsgebiete eine Rolle. Je kleiner die Einzugsgebiete sind, desto höher ist das Potenzial für *heavy-tail*-Verteilungen. Das stützt auch die Hypothese H6 (Tab. 1), die stärkere *heavy tails* in kleineren Einzugsgebieten vermutet. Als Letztes wurde der sogenannte Flashiness Index (FI) als ein signifikanter Faktor im linearen Modell identifiziert. Seine Bedeutung kann aber als sehr gering angesehen werden und daher wird hier nicht weiter darauf eingegangen (Abb. 4b).

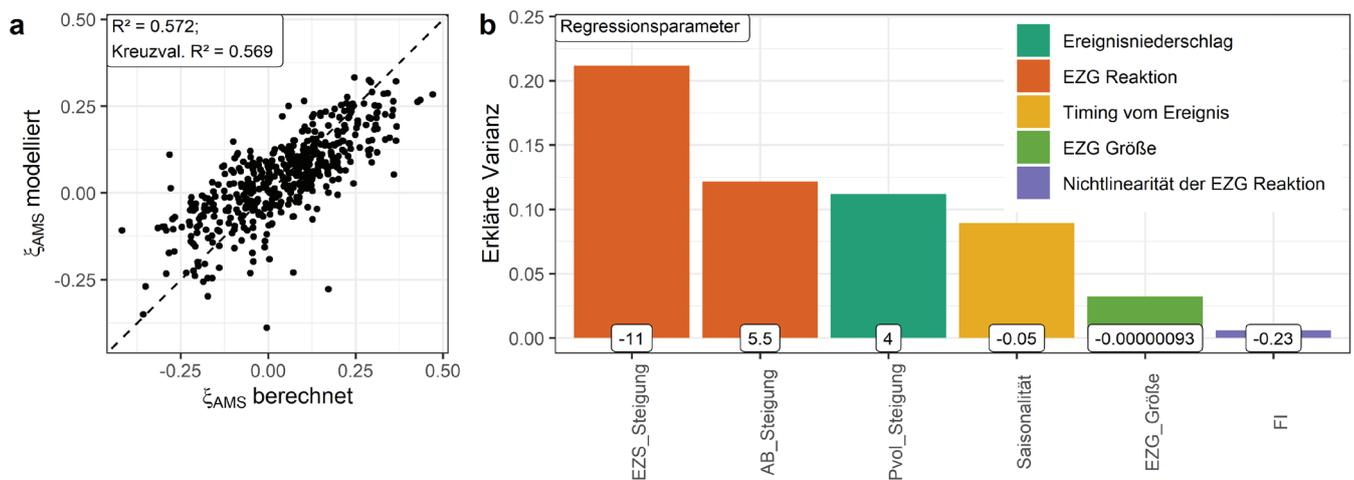


Abbildung 4 Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells (nach MACDONALD et al., 2022): (a) Vergleich von geschätzten und modellierten GEV Shape-Parametern der Hochwasserverteilungen, (b) geschätzte Regressionsparameter und Beiträge der Prädiktoren zu der erklärten Varianz der Shape-Parameter. EZS – Ereigniszeitskala, AB – Abflussbeiwert, Pvol – Niederschlagsvolumen, EZG – Einzugsgebiet, FI – Flashiness-Index. *Results of the multiple linear regression model (adapted from MACDONALD et al., 2022): (a) scatter plot of the estimated and modelled GEV shape parameters of flood distributions, (b) the contribution of predictors to the explained variance of the shape parameters.*

Einzugsgebiete tendieren dazu, Hochwasserverteilungen mit *heavy tails* zu haben, wenn ...

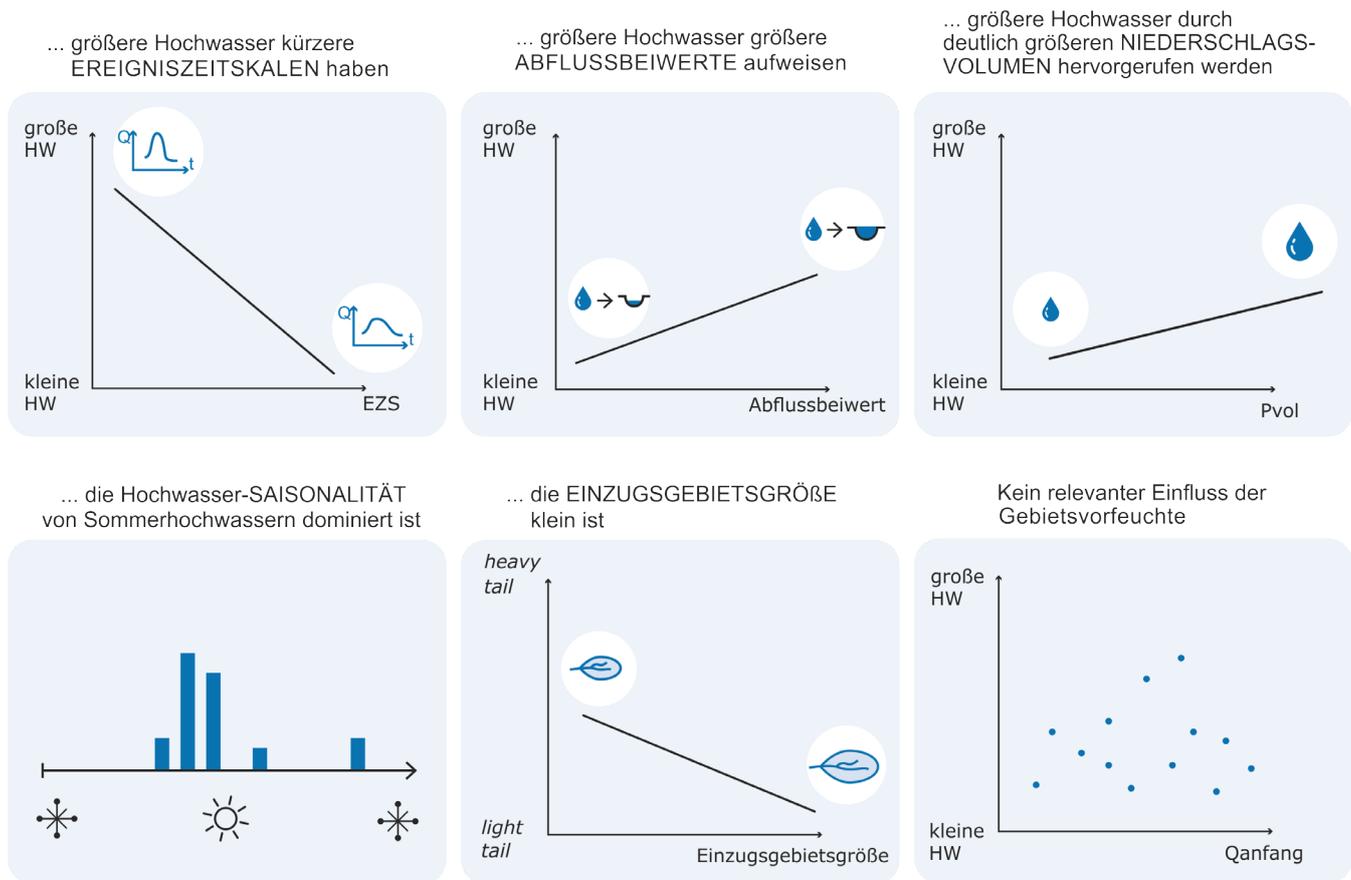


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die *tail heaviness* von Hochwasserverteilungen (nach MACDONALD et al., 2022). *Summary of influencing factors on tail heaviness of flood distributions (adapted from MACDONALD et al., 2022).*

Im multiplen linearen Regressionsmodell wurden in MACDONALD et al. (2022) keine Indikatoren, die den Feuchtezustand des Einzugsgebiets vor einem Ereignis beschreiben, als relevant für *heavy tails* nachgewiesen. Sowohl der Abfluss als auch die modellierte, über das Einzugsgebiet gemittelte Bodenfeuchte vor einem Ereignisbeginn zeigten keinen Zusammenhang mit *heavy tails* auf. Dies mag auf den ersten Blick überraschen, lässt sich jedoch erklären. Zwar korreliert die Vorfeuchte mit dem Hochwasserscheitel, für die Entstehung der ganz großen Extreme, die *heavy tails* ausmachen, reicht das aber nicht aus. Es sind weitere Faktoren entscheidend wie die Abflussbildungsprozesse und die Niederschlagscharakteristika, die oben bereits beschrieben wurden. Abschließend ist zu erwähnen, dass die Rolle aller Prädiktoren auch durch ein nichtlineares Modell (Random Forest) getestet wurde. Die Ergebnisse der linearen und nicht-linearen Modelle decken sich weitgehend (MACDONALD et al., 2022). Das spricht dafür, dass die Zusammenhänge zwischen den Shape-Parametern und den Ereignis- und Einzugsgebietscharakteristika eher linear sind und z. B. keine Sprünge beinhalten, die von einem nichtlinearen Modell besser erfasst werden würden.

3.3 Einfluss von Wellenüberlagerung auf *heavy tails* der Hochwasserverteilungen (H9)

An den untersuchten 37 Zusammenflüssen in Deutschland variiert der Zeitversatz zwischen den Hochwasserwellen um bis zu

mehreren Tagen (GUSE et al., 2020). Diese Variabilität wird durch die raumzeitliche Verteilung des Niederschlags, die Einzugsgebietsreaktion und den Wellenablauf im Gewässernetz gesteuert. Tendenziell kann die Zuflusswelle vor der Hauptstromwelle am Zusammenfluss ankommen wie beim Neckar und Mosel (Abb. 6). Dies wird durch negative Werte des Zeitversatzes dargestellt. Die Zuflusswelle kann aber auch der Hauptstromwelle nachlaufen, was tendenziell im Einzugsgebiet des Mains der Fall ist. Bei einigen Ereignissen treffen die Hauptstrom- und Zuflusswellen direkt d. h. innerhalb eines Tages aufeinander, was einem Zeitversatz von 0 entspricht. Damit die Wellenüberlagerung einen substantiellen Einfluss auf die Entstehung von extremen Hochwassern und damit auf *heavy tails* hat, sollten größere Hochwasser nur bei perfekter Überlagerung (Zeitversatz von 0) entstehen, oder einen deutlichen kleineren Zeitversatz als kleinere Hochwasser zeigen. Dies war bei keinem der 37 Zusammenflüsse der Fall, wie auch die repräsentative Auswahl in Abbildung 6 zeigt. Es konnte damit gezeigt werden, dass die Wellenüberlagerung keine signifikante Rolle für die Entstehung der großen Hochwasser und damit auch von *heavy tails* spielt (GUSE et al., 2020).

GUSE et al. (2020) zeigten, dass sich bei vielen Zusammenflüssen in Deutschland die Hochwasserwellen im Hauptstrom und an den Zuflüssen zwar gegenseitig verstärken können, aber nur eine der beiden Wellen bei einem Hochwasser vergleichsweise

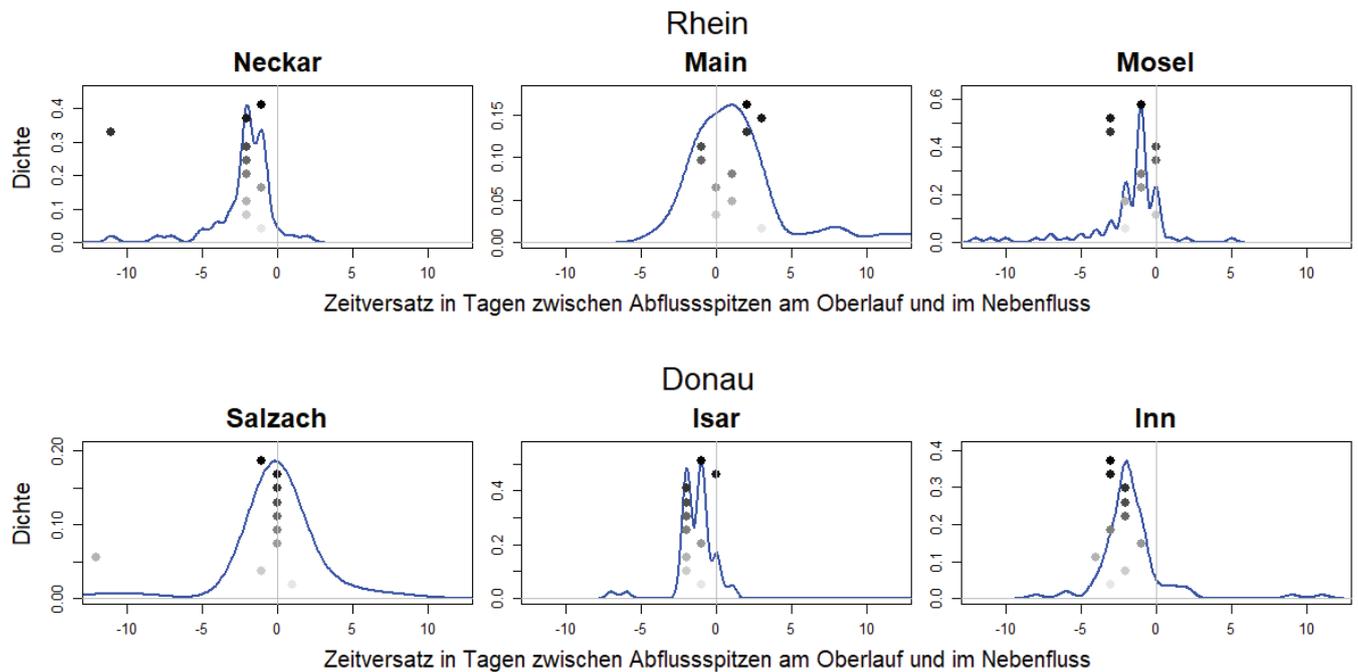


Abbildung 6

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Zeitversatzes in Tagen zwischen Abflussspitzen der Hochwasserwellen im Hauptstrom und Zufluss für jeweils drei Zusammenflüsse im Rhein- und Donau-Einzugsgebiet (verändert nach GUSE et al., 2020). Die grauen Punkte zeigen den Zeitversatz zwischen den Hochwasserwellen bei den 10 größten Ereignissen, die am Pegel im Unterlauf gemessen wurden. Negative Werte des Zeitversatzes zeigen an, dass der Scheitel der Zuflusswelle vor dem Scheitel der Hauptstromwelle am Zusammenfluss ankommt.

Probability density functions of time lag in days between peaks of flood waves in the main channel and tributary for selected confluences in the Rhine and Danube basins (modified from GUSE et al., 2020). The grey dots show the time lag between flood waves of the 10 largest events at the downstream gauge. Negative values of the time lag indicate that the peak of the tributary flood wave arrives earlier at the confluence than the peak of the flood wave in the main river.

groß ausfällt. Ein potenzieller Grund ist das Verhältnis von typischen räumlichen Niederschlagsausdehnungen zu der Größe und Lage des Einzugsgebiets. Im allgemeinen führt nur ein Teil des Einzugsgebiets ein extremes Hochwasser, nicht aber Hauptstrom und Zufluss gleichzeitig. Das kann ein Ergebnis der kurzen Messreihen sein, in denen mögliche aber seltene Überlagerungen nicht enthalten sind, und soll daher künftig mit Modellierungsansätzen untersucht werden. Dennoch wurde eine Reihe von Zusammenflüssen identifiziert, wo große Hochwasser entstehen könnten, sollte sich der Zeitversatz bei großen Ereignissen verschieben. Diese Zusammenflüsse umfassen zum Beispiel Mulde, Mosel, Neckar und Inn. Bei diesen Pegeln ist auch der relative Beitrag der Abflussspitze der Zuflusswelle groß im Vergleich zur Abflussspitze im Hauptstrom. Für das Mulde-Einzugsgebiet zeigten FISCHER et al. (2021), dass der Zeitversatz von der Hochwassergenese abhängig ist. Zwar entstehen die größten Hochwasserabflüsse in der Mulde durch Starkregenereignisse (Sturzfluten), doch die Wahrscheinlichkeit der Wellenüberlagerung ist bei diesem Hochwassertyp aufgrund von Reaktionszeiten der Teilgebiete vergleichsweise gering. Die Hochwassergenese kann sich allerdings aufgrund des Einflusses des Klimawandels verschieben und Hochwassertrends beeinflussen (BLÖSCHL et al., 2019). Für das Einzugsgebiet des Rheins zeigten RÖTTLER et al. (2021) hingegen in einer Modellierungsstudie, dass keine verstärkte Überlagerung von nivalen und pluvialen Hochwassern u. a. an Neckar- und Mosel-Zuflüssen im Zuge des Klimawandels zu erwarten ist.

4 Schlussfolgerungen

Einzugsgebiete mit Hochwasserverteilungen, die sogenannte *heavy tails* aufweisen, können häufiger extreme und überraschende Hochwasser generieren als Gebiete mit *light-tail*-Verteilungen. Aufgrund der kurzen Länge von gemessenen Abflusszeitreihen bzw. einer nur geringen Anzahl von großen Hochwassern, ist es oft schwer die *tail heaviness* belastbar festzustellen. Die *tail heaviness* kann zum Beispiel durch den Shape-Parameter der GEV-Verteilung charakterisiert werden. Um die Hochwasserwahrscheinlichkeiten verlässlicher abschätzen und insbesondere die Gebiete identifizieren zu können, die *heavy-tail*-Verteilungen aufweisen können, ist die Identifikation von Faktoren erforderlich, die den rechten Rand von Verteilungen beeinflussen. Der vorliegende Beitrag fasst neun Hypothesen von MERZ et al. (2022) zusammen, die die Einflussfaktoren von *heavy tails* betrachten. Davon werden drei Hypothesen näher untersucht. Anhand eines umfangreichen Datensatzes von hydro-meteorologischen Daten und Einzugsgebietscharakteristika in Deutschland und Österreich werden die *heavy tails* und deren Einflussfaktoren analysiert und folgende Schlussfolgerungen gezogen:

1. Die Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Maxima von täglichen Abflüssen in Deutschland und Österreich sowie von täglichen Niederschlägen in Deutschland weisen überwiegend *heavy tails* auf. Für die Bestimmung von Bemessungs-

größen werden daher flexible Verteilungen empfohlen, die *heavy tails* abbilden können, wie z. B. die Generalisierte Extremwertverteilung oder die Generalisierte Pareto-Verteilung. Zwei-parametrische Verteilungen mit einem *light tail*, wie die Gumbel-Verteilung oder Gamma-Verteilung, sollten nur nach genauer Prüfung eingesetzt werden. Um das *tail*-Verhalten besser abzuschätzen, sollten insbesondere extreme Ereignisse hinsichtlich ihrer Genese analysiert werden.

2. In den Einzugsgebieten in Deutschland und Österreich, die dazu neigen extreme, überraschende Hochwasser zu generieren, zeichnen sich die größten beobachteten Hochwasser im Vergleich zu kleineren Ereignissen durch eine schnellere Gebietsreaktion, einen höheren Abflussbeiwert sowie höhere Niederschlagsvolumina aus. In einem konkreten Fall sollte deshalb analysiert werden, wie sich die Abflussbildung und ihr Zusammenspiel mit dem Ereignisniederschlag beim Übergang von kleinen zu großen Hochwassern ändert. Sind zum Beispiel deutliche Verschiebungen bei Ereigniszeitskalen und Abflussbeiwerten zwischen kleineren und größeren Hochwassern zu beobachten, während die Niederschläge von bisher gemessenen Ereignissen mit hoher Wahrscheinlichkeit noch deutlich überschritten werden können, ist von einem stärkeren *heavy tail* bei der Hochwasserverteilung auszugehen als aus der beobachteten Stichprobe hervorgeht.
3. Die Analyse der Überlagerung von Hochwasserwellen an Haupt- und Nebenflüssen in Deutschland zeigt, dass die Hochwasserspitzen der größten Ereignisse nicht zeitgleich auftreten. Die Überlagerung von Hochwasserwellen an Zusammenflüssen in Deutschland ist oft nicht der entscheidende Faktor für die Entstehung von *heavy tails* von Hochwasserverteilungen.

Die vorliegenden Erkenntnisse erweitern den Ansatz der "Extremwerthydrologie" (MERZ & BLÖSCHL, 2008A; MERZ & BLÖSCHL, 2008B; VIGLIONE et al., 2013) mit dem Fokus auf *heavy tails*. Sollten Einzugsgebiete anhand der in der 2. Schlussfolgerung aufgelisteten Merkmale identifiziert werden, in denen die *heavy tails* unterschätzt werden können, bietet sich folgendes Vorgehen an: neben der zeitlichen und räumlichen Informationserweiterung (MERZ & BLÖSCHL, 2008A; MERZ & BLÖSCHL, 2008B) kann eine synthetische Erweiterung von Zeitreihen mittels abgeleiteter Hochwasserstatistik genutzt werden (DWA, 2012; HABERLANDT & RADTKE, 2011), um eine bessere Abschätzung von *heavy tails* bzw. Shape-Parametern zu erzielen. Die in SPATE-Teilprojekten 3 (NGUYEN et al., 2021), 5 (BARDOSSY & PEGRAM, 2011) und 7 (HABERLANDT et al., DIESE HYWA-AUSGABE) entwickelten bzw. getesteten stochastischen Wettergeneratoren bieten dafür in Kombination mit Niederschlag-Abfluss-Modellen, die die für die Entstehung von *heavy tails* relevanten Prozesse abbilden können, ein geeignetes Instrumentarium an.

Conclusions

Catchments with flood distributions that exhibit so-called heavy tails can generate extreme and surprising floods more frequently than catchments with light-tailed distributions. Due to the short length of the measured runoff time series or only a small number of large floods, it is often difficult to reliably

estimate tail heaviness. Tail heaviness is, for example, characterized by the shape parameter of the GEV distribution. In order to estimate flood probabilities more reliably and, in particular, to identify catchments that may exhibit heavy-tailed distributions, the identification of factors that influence heavy tails is required. This paper summarizes nine hypotheses from MERZ et al. (2022) that consider factors influencing heavy tails. In this study, we investigate three of them in details. Using an extensive data set of hydro-meteorological data and catchment characteristics in Germany and Austria, heavy tails and their influencing factors are analyzed and the following conclusions are drawn:

1. The frequency distributions of the annual maxima of daily runoff in Germany and Austria and of daily precipitation in Germany show predominantly heavy tails. Therefore, flexible distributions that can represent heavy tails, such as the Generalized Extreme Value Distribution or the Generalized Pareto Distribution, are recommended for the determination of design values. Two-parametric distributions with a light tail, such as the Gumbel distribution or Gamma distribution, should only be used after careful examination. To better estimate the tail behavior, extreme events in particular should be analyzed with respect to their genesis.
2. In catchments in Germany and Austria, which tend to generate extreme, surprising floods, the largest observed floods are characterized by a faster catchment response, a higher runoff coefficient and higher precipitation volumes compared to smaller events. In a particular case, one should therefore focus on how runoff generation and its interaction with event precipitation changes during the transition from small to large floods. For example, if significant shifts in event time scales and runoff coefficients are observed between smaller and larger floods, but precipitation from previously measured events is still likely to be significantly exceeded, then a heavier tail of flood distribution than indicated by the observed sample should be assumed.
3. The analysis of the superposition of flood waves at main and tributary rivers in Germany shows that the flood peaks of the largest events often do not occur simultaneously. The superposition of flood waves at confluences in Germany is not the decisive factor for the occurrence of heavy tails of flood distributions.

The present findings extend the "flood frequency hydrology" approach (MERZ & BLÖSCHL, 2008A; MERZ & BLÖSCHL, 2008B; VIGLIONE et al., 2013) with a focus on heavy tails. Should catchments be identified based on the characteristics listed in the 2nd conclusion where heavy tails can be underestimated, a synthetic extension of time series using derived flood statistics (DWA, 2012, HABERLANDT & RADTKE, 2011) is an option in addition to the temporal and spatial information extension (MERZ & BLÖSCHL, 2008A; MERZ & BLÖSCHL, 2008B) to achieve a better estimation of heavy tails or shape parameters. The stochastic weather generators developed or tested in SPATE subprojects 3 (NGUYEN et al., 2021), 5 (BARDOSSY & PEGRAM, 2011) and 7 (HABERLANDT et al., THIS HYWA-ISSUE) offer a suitable set of tools for this purpose in combination with rainfall-runoff models that can represent the processes relevant for the formation of heavy tails.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Gemessene Abflussdaten an Pegeln in Deutschland und Österreich sind von hydrometrischen Diensten auf Anfrage erhältlich und können hier aufgrund von Weitergabebeschränkungen nicht verfügbar gemacht werden. Die täglichen Niederschlagszeitreihen von den Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes sind vom Climate Data Center (<https://cdc.dwd.de/portal/>) verfügbar. Einzugsgebietscharakteristika und Hochwasserereigniseigenschaften, die für die Ableitung potenzieller Prädiktoren von *tail heaviness* verwendet wurden, sind über den GFZ Data Service verfügbar unter <https://doi.org/10.5880/GFZ.4.4.2021.004> (MACDONALD et al., 2021).

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Forschergruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (GRK 2043/2) durchgeführt.

Anschrift der Verfasser

Dr. Sergiy Vorogushyn
 Dr. Björn Guse
 Elena Macdonald
 Luzie Wietzke
 Prof. Dr.-Ing. Bruno Merz
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
 Sektion Hydrologie
 Telegrafenberg
 14473 Potsdam
sergiy.vorogushyn@gfz-potsdam.de;
bjoern.guse@gfz-potsdam.de
elena.macdonald@gfz-potsdam.de
luzie.wietzke@gfz-potsdam.de
bruno.merz@gfz-potsdam.de

Zweite Affiliation

Prof. Dr.-Ing. Bruno Merz
 Universität Potsdam
 Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
 Karl-Liebknecht-Str. 24-25
 14476 Potsdam

Literaturverzeichnis

- BARDOSSY, A., & G. PEGRAM (2011): Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, 47, W04505. DOI:10.1029/2010WR009689.
- BLÖSCHL, G., J. HALL, A. VIGLIONE, R.A. PERDIGÃO, J. PARAJKA, B. MERZ, ... & N. ŽIVKOVIĆ (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111. DOI:10.1038/s41586-019-1495-6.
- DWA (2012): Merkblatt DWA-M 552 – Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. ISBN: 978-3-942964-25-8.
- EL ADLOUNI, S., B. BOBÉE & T.B.M.J. OUARDA (2008): On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 16-33. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.02.011.
- FISCHER, S., P. BÜHLER & A. SCHUMANN (2021): Impact of Flood Types on Superposition of Flood Waves and Flood Statistics Downstream. *Journal of Hydrologic Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002103.
- FISCHER, S., A. SCHUMANN & M. SCHULTE (2016): Characterisation of seasonal flood types according to timescales in mixed probability distributions. *Journal of Hydrology* 539, 38-56.
- FISCHER, S. & A. SCHUMANN (2020): Spatio-temporal consideration of the impact of flood types on flood statistics. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 1331-1351. DOI: 10.1007/s00477-019-01690-2.
- GAÁL, L., J. SZOLGAY, S. KOHNOVÁ, J. PARAJKA, R. MERZ, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2012): Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, 48(4), W04511. DOI:10.1029/2011WR011509.
- GUSE, B., B. MERZ, L. WIETZKE, S. ULLRICH, A. VIGLIONE & S. VOROGUSHYN (2020): The role of flood wave superposition in the severity of large floods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 1633-1648. DOI:10.5194/hess-24-1633-2020.
- HABERLANDT, U. & I. RADTKE (2011): Reducing uncertainty in derived flood frequency analysis related to rainfall forcing and model calibration. *IAHS Publ.* 347, 10-15.
- HAYLOCK, M., N. HOFSTRA, A.M.G. KLEIN TANK, E.J. KLOK, P.D. JONES & M. NEW (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature, precipitation and sea-level pressure. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119. DOI:10.1029/2008JD010201.
- KEMTER, M., B. MERZ, N. MARWAN, S. VOROGUSHYN & G. BLÖSCHL (2020): Joint trends in flood magnitudes and spatial extents across Europe. *Geophysical Research Letters*, 46, e2020GL087464. DOI: 10.1029/2020GL087464.
- KREIBICH, H., A.F. VAN LOON, K. SCHRÖTER et al. (2022). The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature* 608, 80-86. DOI:10.1038/s41586-022-04917-5.
- MACDONALD, E., B. MERZ, B. GUSE, L. WIETZKE, S. ULLRICH, M. KEMTER, B. AHRENS & S. VOROGUSHYN (2022): Event and catchment controls of heavy tail behavior of floods. *Water Resources Research*, 58, e2021WR031260. DOI:10.1029/2021WR031260.
- MACDONALD, E., B. MERZ, S. ULLRICH, S. LÜDTKE, K. SCHRÖTER, B. GUSE, L. WIETZKE, M. KEMTER, B. AHRENS & S. VOROGUSHYN (2021): Flood event and catchment characteristics in Germany and Austria [Dataset]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.4.4.2021.004>.
- MERZ, B., S. BASSO, S. FISCHER, D. LUN, G. BLÖSCHL, R. MERZ, B. GUSE, A. VIGLIONE, S. VOROGUSHYN, E. MACDONALD, L. WIETZKE & A. SCHUMANN (2022): Understanding heavy tails of flood peak distributions. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030506. DOI:10.1029/2021WR030506.
- MERZ, B., S. VOROGUSHYN, U. LALL, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2015): Charting unknown waters – On the role of surprise in flood risk assessment and management. *Water Resources Research*, 51(8), 6399-6416. DOI:10.1002/2015WR017464.
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2008a): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resour. Res.*, 44, W08432, DOI:10.1029/2007WR006744.
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2008b): Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resour. Res.*, 44, W08433, DOI:10.1029/2007WR006745.
- NGUYEN, D., B. MERZ, Y. HUNDECHA, U. HABERLANDT & S. VOROGUSHYN (2021): Comprehensive evaluation of an improved large-scale multi-site weather generator for Germany. *International Journal of Climatology*, 41, 10, 4933-4956. DOI:10.1002/joc.7107.
- PAPALEXIOU, S.M., & D. KOUTSOYIANNIS (2013): Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, 49(1), 187-201. DOI:10.1029/2012WR012557.
- PRIMO, C., F.D. KELEMEN, H. FELDMANN & B. AHRENS (2019): A regional atmosphere-ocean climate system model (CCLMv5.0clm7-NEMOv3.3-NEMOv3.6) over Europe including three marginal seas: On its stability and performance. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 5077-5095. DOI:10.5194/gmd-12-5077-2019.

- ROTTLER, E., A. BRONSTERT, G. BÜRGER & O. RAKOVEC (2021): Projected changes in Rhine River flood seasonality under global warming, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 2353–2371. DOI:10.5194/hess-25-2353-2021.
- SAMANIEGO, L., R. KUMAR & S. ATTINGER (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46, W05523. DOI:10.1029/2008WR007327.
- TARASOVA, L., S. BASSO & R. MERZ (2020): Transformation of generation processes from small runoff events to large floods. *Geophys. Res. Lett.* 47 (22), e2020GL090547.
- TALEB, N.N. (2007): *The Black swan: The impact of the highly improbable* (p. 444). Random House.
- VILLARINI, G., & J.A. SMITH (2010): Flood peak distributions for the eastern United States. *Water Resources Research*, 46(6), 1–17. DOI:10.1029/2009WR008395.
- 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.
- VIGLIONE, A., R. MERZ, J.S. SALINAS & G. BLÖSCHL (2013): Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis. *Water Resources Research*, 49, 675–692, DOI:10.1029/2011WR010782.
- WANG, H.-J., R. MERZ, S. YANG, L. TARASOVA, S. BASSO (2023): Emergence of heavy tails in streamflow distributions: the role of spatial rainfall variability *Adv. Water Resour.* 171, 104359.
- WIETZKE, L., B. MERZ, L. GERLITZ, H. KREIBICH, B. GUSE, A. CASTELLARIN, & S. VOROGUSHYN (2020): Comparative analysis of scalar upper tail indicators. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1625–1639. DOI:10.1080/02626667.2020.1769104.