Svenja Fischer & Andreas H. Schumann

Berücksichtigung von Hochwassertypen in der Hochwasserstatistik

Consideration of flood types in flood statistics

Das Teilprojekt 1 der DFG-Forschungsgruppe befasste sich mit der Ereignisanalyse extremer Hochwasser. Hierzu wurden etwa 60.000 Hochwasserereignisse an 263 Pegeln analysiert. Es wurde deutlich, dass Hochwasser zwar sehr unterschiedliche Verläufe haben, jedoch in Hinblick auf ihre meteorologischen Ursachen in fünf Ereignistypen unterteilt werden können. Damit wurde das seit den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts in der Hochwasserstatistik bestehende Paradigma einer homogenen Stichprobe der Jahreshöchstwerte in Frage gestellt. Als Alternative wurde eine Methodik zur Schätzung von typspezifischen Verteilungsfunktionen aus partiellen Serien und deren Kombination zu einer Gesamtverteilung mithilfe eines Mischungsmodells entwickelt. Die Vorteile dieses neuen statistischen Modells bestehen darin, dass es nunmehr möglich ist, die unterschiedlichen Häufigkeiten einzelner Ereignistypen und deren Einfluss auf die Gesamtverteilung differenziert nach häufigen und seltenen Hochwasserscheitelwerten zu ermitteln sowie die Abhängigkeiten zwischen Scheitel, Fülle und Ganglinienformen typabhängig zu beschreiben und als neue Bemessungsgrundlagen zu nutzen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Ableitung von räumlichen Hochwasserszenarien auf Basis probabilistischer Ganglinien in Flussgebieten mit Wahrscheinlichkeitsaussage und der Möglichkeit, die zeitliche Variabilität der Häufigkeiten und Intensität der einzelnen Typen zu erfassen und statistisch zu berücksichtigen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse für eine Auswahl an Pegeln in Bayern und dem Rhein.

Schlagwörter: Hochwasserstatistik, Hochwassertypen, typbasierte Statistik, Hochwasserszenarien

Sub-project 1 of the DFG research unit dealt with the event analysis of extreme floods. For this purpose, about 60,000 flood events at 263 gauges were analysed. It became obvious that although floods have very different courses, they can be divided into five event types with regard to their meteorological causes. This called into question the paradigm of a homogeneous sample of annual maximum values that has existed in flood statistics since the 1940s. As an alternative, a methodology was developed for estimating type-specific distribution functions from partial series and combining them into an overall distribution using a mixture model. The advantages of this new statistical model are that it is now possible to determine the different frequencies of individual event types and their influence on the overall distribution, differentiated according to frequent and infrequent flood peak values, as well as to describe the dependencies between peak, fullness and hydrograph shapes in a type-dependent manner and to use them as new design bases. Further application possibilities result from the derivation of spatial flood scenarios based on probabilistic hydrographs in river basins with probability statements and the possibility to record and statistically consider the temporal variability of the frequencies and intensities of the individual types. This paper gives an overview of the most important results for a selection of catchments in Bavaria and the Rhine River.

Keywords: flood statistics, flood types, type-based statistics, flood scenarios

1 Einleitung

Hochwasser haben sehr verschiedene Ursachen. Das Teilprojekt 1 "Ereignisanalyse Extremer Hochwasser" der DFG-Forschungsgruppe "Space-Time Dynamics of Extreme Floods" sollte ursprünglich die wesentlichen Merkmale von Hochwasserereignissen unterschiedlicher Größenklassen des Scheitelabflusses ermitteln und vergleichen, um so die Besonderheiten extremer Hochwasserereignisse herauszuarbeiten. Es zeigte sich jedoch, dass hierzu je nach ihrer Entstehung eine Unterteilung der Hochwasser in verschiedene Typen sinnvoll ist. Im Ergebnis wurde eine Methodik entwickelt, die eine weitgehend automatisierte Typisierung von Hochwasserereignissen nach deren Ursachen erlaubt. Da hierdurch die Grundannahme einer homogenen Stichprobe, die in den vierziger Jahren von dem deutschen Statistiker Gumbel im Rahmen der Entwicklung der mathematischen Hochwasserstatistik postuliert wurde, in Frage gestellt ist, wurde konsequenterweise ein völlig neuer methodischer Ansatz der Hochwasserstatistik entwickelt. Durch die direkte Berücksichtigung der Ereignisgenese erweitert dieser Ansatz klassische Mischungsmodelle der Hochwasserstatistik, wie z. B. das von ROSSI et al. (1984), welche ebenfalls die Homogenität der Stichprobe in Frage stellen, jedoch i. d. R. keine deterministische

Unterteilung der Stichproben vornehmen. Zudem kann der vorgestellte Ansatz auch als direkte Weiterentwicklung der bereits seit einigen Jahren angewendeten saisonalen Hochwasserstatistiken (SCHUMANN, 2005; MUDERSBACH, 2022) gesehen werden. Mit dem "Typbasierten Mischungsmodell Partieller Serien" (TMPS) ist es möglich, verschiedene Typen von Hochwasserereignissen zu unterscheiden, diese statistisch separat zu analysieren, Verteilungsfunktionen für jeden Typ zu schätzen und im Ergebnis mithilfe eines Mischungsmodells eine neue Ermittlung von Hochwasserquantilen gegebener Jährlichkeiten vorzunehmen. Aus den untersuchten Anwendungsmöglichkeiten des TMPS-Modells ergeben sich eine Reihe wesentlicher neuer Möglichkeiten zur Bereitstellung statistischer Aussagen. So ist es nunmehr möglich:

- die Heterogenität von Stichproben in ihrer Genese unterschiedlicher Hochwasserereignisse explizit in hochwasserstatistischen Modellen zu berücksichtigen,
- Wahrscheinlichkeitsaussagen zu treffen, inwieweit ein Hochwasserscheitelabfluss vorgegebener Jährlichkeit durch einen bestimmten Hochwassertyp bedingt wurde,
- die ermittelten hochwassertypspezifischen statistischen Beziehungen zwischen Hochwasserscheitel und -fülle bzw.

zwischen Hochwassertyp und Ganglinienform zu nutzen, um Hochwasserszenarien zu definieren, deren Wahrscheinlichkeit ermittelt und mit anderen Szenarien verglichen werden kann,

 eine statistische Charakterisierung der räumlichen Verteilung zeitlich konsistenter Hochwasserereignisse in großen Flussgebieten vorzunehmen, die zur Ableitung räumlicher Hochwasserszenarien genutzt werden können.

In diesem Beitrag werden kurz das entwickelte statistische Modell und im Detail einige dieser Anwendungsfälle beschrieben. Weitere Details zu den verwendeten Methoden sind in den jeweils zitierten publizierten Vorarbeiten zu finden.

2 Datenbasis

Für das Projekt wurden insgesamt 263 Pegel in Deutschland und Österreich ausgewertet. Diese repräsentieren die Hochwasserverhältnisse von 166 kleinen bis mittleren Einzugsgebieten (Flächengröße von 34 bis 1.000 km²) in Bayern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen und Sachsen-Anhalt, Tirol und Oberösterreich sowie 43 großen Einzugsgebieten (Flächen zwischen 1.000 und 10.000 km²). Für die Flussgebiete Rhein, Elbe und Donau wurden 32 Pegel mit sehr großen Einzugsgebieten (Flächen zwischen 10.000 km² und 140.000 km²) ausgewählt. Neben der Betrachtung verschiedener Raumskalen ermöglichte diese Auswahl die Berücksichtigung verschiedener Naturräume wie z. B. die Alpen, Mittelgebirge oder Flachland und somit auch unterschiedlicher Einzugsgebietscharakteristika wie mittlere Höhe, Gebietsgröße, Landnutzung und Böden.

Für die Separation der Hochwasserereignisse wurden Zeitreihen mittlerer täglicher Abflüsse verwendet, da eine höhere zeitliche Auflösung von Abflussdaten oftmals nicht über einen für die Statistik hinreichend langen Beobachtungszeitraum vorliegt. Zusätzlich wurden die monatlichen Höchstabflüsse (Stundenwerte) verwendet, um die Hochwasserscheitel zu erfassen. Durch die Hochwasserseparation konnte garantiert werden, dass nur Monatshöchstwerte verwendet wurden, welche tatsächlich am Tag des Hochwasserscheitels aufgetreten sind bzw. ein Tag davor oder danach, um die Ungenauigkeit der mittleren Tageswerte zu berücksichtigen. Die Hochwasserscheitel würden durch Verwendung von Tagesmitteln, insbesondere in kleinen Einzugsgebieten, stark unterschätzt (BARTENS & HABERLANDT, 2021). Es wurden ausschließlich Zeitreihen mit mehr als 30 Jahren Beobachtungslänge – Median von 69 Jahren – sowohl für die Tages- als auch die Monatswerte berücksichtigt. Für eine solche Beobachtungslänge liegen keine stündlichen Abflusswerte vor. Für die Hochwasserseparation wurde ein automatisiertes Verfahren nach FISCHER et al. (2021) verwendet, welches anhand eines Schwellenwertes für die Streuung von Tagesmittelwerten in einem gleitenden Drei-Tages-Fenster abrupte Anstiege in den Abflüssen und somit den Hochwasserbeginn detektiert. Das Hochwasserende wurde anhand von Kriterien basierend auf dem Verhältnis von Direktzu Basisabfluss bestimmt. Das bedeutet, dass das Hochwasserende als der Zeitpunkt definiert wurde, an dem entweder der Wert des Abflusses unmittelbar vor Hochwasserbeginn erreicht wurde oder sich der Abfluss in der Rückgangsphase der Hochwasserwelle nicht mehr wesentlich verringerte. Der Direktabfluss wurde mittels einer Geraden zwischen dem Abflusswert am Hochwasserbeginn und dem am Hochwasserende separiert. Zusätzlich wurden noch spezielle Wellenformen berücksichtigt wie mehrgipflige Ganglinien oder sogenannte aufgesetzte Wellen, d. h., wenn in einem Zeitraum erhöhten Basisabflusses mehrere kleinere Hochwasser in Folge auftreten. Insgesamt ergaben sich so mehr als 60.000 separierte Hochwasserwellen in den betrachteten Einzugsgebieten, wobei im Mittel für jeden betrachteten Pegel etwa drei bis vier Hochwasserereignisse pro Jahr separiert wurden. Nach Separation des Direktabflusses wurden das Hochwasservolumen, die Hochwasserdauer und der Basisabfluss abgeleitet. Zu jedem Hochwasserereignis wurde der hochwasserauslösende Niederschlag aus dem 0,1-Grad-Datensatz des E-OBS (Ensembles daily gridded observational dataset for precipitation, temperature and sea level pressure in Europe; CORNES et al., 2018) ermittelt. Um den Niederschlagsbeginn zu ermitteln, fand ein statistischer Bruchpunkttest Anwendung. Dazu wurde die kumulierte Niederschlagssumme in einem von der Größe des Einzugsgebiets abhängigen Zeitraum vor dem Auftreten des Hochwasserscheitels in zwei Zeitabschnitte unterteilt und jeweils eine lineare Regression zwischen den kumulativ ermittelten Niederschlagswerten und einem Zeitindex für jeden der Abschnitte angepasst. Der variierte Punkt der Unterteilung, für den sich die maximale Differenz der Steigungen der Regression ergab, wurde als Niederschlagsbeginn definiert (FISCHER et al., 2021). Der Endpunkt ergab sich als der Tag, an dem letztmalig mehr als 5 mm Niederschlag fielen. Die zu den Hochwasserereignissen im Winterhalbjahr oftmals zugehörige Schneeschmelze wurde mittels des Tag-Grad-Verfahrens (RANGO & MARTINEC, 1995) unter Berücksichtigung des klimatischen Höhengradienten der Temperatur (0,7 Grad pro 100 m Höhenunterschied) und der Höhenstufen im Einzugsgebiet sowie der Niederschläge vor dem jeweiligen Hochwasser ermittelt. Die so erhaltenen Hochwasserereignisse mit zugehörigen Charakteristiken bilden die Grundlage für die im Folgenden beschriebene Definition der Hochwassertypen.

3 Definition von Hochwassertypen

Hochwassertypen klassifizieren Hochwasserereignisse meist anhand bestimmter Merkmale wie den großräumigen Wetterlagen, den maßgebenden hydrologischen Prozessen im Einzugsgebiet oder der Ganglinienform (TARASOVA et al., 2019). Komplexe Klassifizierungen der Hochwasserentstehung erfordern jedoch oftmals Kenngrößen, die für lange Abflussreihen nicht zur Verfügung stehen. In Hinblick auf die Auswertung von Hochwasserdaten aus langen Reihen wurde deshalb ein Ansatz gewählt, welcher lediglich auf gemessenen Niederschlags- und simulierten Schneeschmelzdaten sowie den separierten Hochwasserganglinien basiert und eine Anwendung auch für weit zurückliegende Beobachtungszeiträume erlaubt. Für die Klassifizierung der Hochwasserentstehungstypen erfolgte hierzu zunächst eine Unterteilung der Hochwasser in regen- und schneebeeinflusste Ereignisse. Ein Hochwasser, bei dem der Anteil der Schneeschmelze am Niederschlagsdargebot (Regensumme plus Schneeschmelze) unter 20 % liegt, wurde als Regenhochwasser klassifiziert. Die Regenhochwasser wurden dann anhand ihrer Ganglinienform weiter unterteilt. Hierzu wurde die Hochwasserzeitskale (TQ-Wert in Stunden) (GAAL et al., 2012) genutzt. Diese charakterisiert das Verhältnis von Hochwasservolumen zu Hochwasserscheitel und beschreibt somit die Spreizung der Hochwasserwelle. Unter Annahme linearer Beziehungen zwischen Hochwasservolumen und -scheitel wurden die beobachteten Hochwasser einem von drei Regenhochwassertypen zugeordnet:

- Hochwasser mit kleinem T_o-Wert als Typ R1 (in Relation zum Scheitel eher kleines Volumen),
- Hochwasser mit mittlerem T_Q-Wert als Typ R2 (ausgewogene Relation zwischen Scheitel und Volumen) und
- Hochwasser mit großem T_Q-Wert als Typ R3 (in Relation zum Volumen eher kleiner Scheitel).

Die Zuordnung der beobachteten Hochwasserereignisse zu den Typen geschah mittels der Optimierung der linearen Beziehung zwischen Scheitel und Volumen (Abb. 1), sodass jeweils drei typspezifische T_o-Werte ermittelt wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die großen Hochwasser einen stärkeren Einfluss auf die Typisierung haben, jedoch auch gleichzeitig in der Relation zwischen Volumen und Scheitel von den übrigen Hochwassern abweichen können. Daher ist die Typisierung großer Hochwasser (z. B. Camp-Meidell-Klassifizierung, Klassen 1 und 2; FISCHER & SCHUMANN, 2018) separat zu überprüfen. Auch die Schneehochwasser wurden mittels eines Cluster-Verfahrens weiter unterteilt. Hierbei wurde die k-Means-Clusterung (MACQUEEN, 1967) auf Basis von Niederschlagssumme, simulierter Schmelzwassersumme und Abflussbeiwert genutzt. Damit wurden die Schneehochwasser in Regen-auf-Schnee-Hochwasser (S1) und Schneeschmelzhochwasser (S2) aufgeteilt. Regen-auf-Schnee-Hochwasser weisen aufgrund des höheren Wasseranteils nur eine geringe Retention der Schneedecke und eine vergleichsweise kurze Hochwasserganglinie auf. Schneeschmelzhochwasser hingegen zeigen eine deutliche Wasserspeicherung und damit verbunden eine längere Hochwasserwelle. Somit ergaben sich insgesamt fünf Hochwassertypen (Abb. 1), die deutlich mit den hochwasserauslösenden Prozessen koinzidieren (Abb. 2), wie in mehreren Studien festgestellt wurde (BRUNNER & FISCHER, 2022; FISCHER et al., 2019; FISCHER & SCHUMANN, 2019; 2021a; 2021b).

Die Hochwasser des Typs R1 sind demnach durch eine kurze Niederschlagsdauer (meist zwischen ein und fünf Tagen) gekennzeichnet, was bei entsprechend hoher Regensumme und demzufolge hohen Niederschlagsintensitäten mit lokalen Starkregenereignissen assoziiert werden kann. Hochwasser des Typs R2 hingegen weisen ein großes Volumen in Relation zum Hochwasserscheitel auf. Die zugehörigen Regenereignisse sind von längerer Dauer (> 5 Tage), sodass dieser Hochwassertyp mit Dauerregen assoziiert wird. Der Hochwassertyp R3 sticht unter den Regenhochwassern heraus. Das Hochwasservolumen dieses Typs ist in Relation zum Hochwasserscheitel sehr groß. Oftmals treten bei diesem Typ auch mehrere Hochwasserscheitel in kurzer Abfolge auf, wodurch eine Separation dieser Einzelwellen nicht möglich ist und Mehrfachwellen betrachtet werden müssen. Das zugehörige Niederschlagsereignis ist dabei meist durch mehrere



Hochwassertypen

Abbildung 1

Hochwassertypisierung anhand der auslösenden meteorologischen Prozesse sowie der Ganglinienform. Flood typing based on the flood-generating meteorological processes and the hydrograph shape.



Abbildung 2

Charakteristika der verschiedenen Hochwassertypen für alle betrachteten Einzugsgebiete. *Characteristics of the different flood types for all catchments under consideration.*

Episoden von Niederschlägen mit geringer Intensität, aber langer Dauer gekennzeichnet. Dies bewirkt eine Auffeuchtung der Böden, so dass nachfolgender Niederschlag dann unmittelbar zu einer Abflussreaktion führt. Die Regen-auf-Schnee-Hochwasser vom Typ S1 beschreiben Hochwasser, die entstehen, indem eine größere Regenmenge mit hoher Intensität auf eine vergleichsweise dünne Schneedecke fällt, woraufhin Schmelzwasser in kurzer Frist freigesetzt wird und zu Abfluss führt. Schneeschmelzhochwasser vom Typ S2 hingegen entstehen, indem eine mächtigere Schneedecke aufgrund erhöhter Temperaturen schmilzt, zusätzlicher Regen zunächst in der Schneedecke gespeichert wird und dann später verzögert abgegeben wird. In Folge der höhenabhängigen Temperaturgradienten tritt der Schmelzprozess zeitlich verzögert in den verschiedenen Höhenstufen auf.

4 Berücksichtigung von Hochwassertypen in der Hochwasserstatistik

4.1 Multiplikatives Mischungsmodell TMPS

Die verschiedenen Hochwassertypen unterscheiden sich nicht nur in ihren Merkmalen und Entstehungsursachen, sondern auch in den statistischen Verteilungen der Hochwasserscheitel. So ist beispielsweise die Häufigkeitsverteilung der Starkregenhochwasser (R1) zumeist durch einige extrem hohe, seltene Hochwasser geprägt. Die angepasste Verteilungsfunktion hat demzufolge einen exponentiell unbegrenzten Verlauf für größer werdende Jährlichkeiten. Dieses Phänomen tritt z. B. bei Schneeschmelzhochwasser (S2) nicht auf. Eine Mischung der verschiedenen Hochwassertypen in einer Stichprobe, wie es beispielsweise bei der Stichprobe der Jahreshöchstabflüsse der Fall ist, führt daher nicht nur zu einer inhomogenen Stichprobe, was den Grundannahmen der meisten statistischen Modelle widerspricht, sondern auch zu einer Art von Ausgleich im besonders bemessungsrelevanten Bereich der großen Jährlichkeiten, der zu einer Unterschätzung der extremen Hochwasser führen kann.

Um diesen Effekt zu vermeiden, sollten die einzelnen Hochwassertypen statistisch separat betrachtet werden (FISCHER, 2018). Dazu wird jeweils eine eigene Verteilungsfunktion an die Stichprobe jedes einzelnen Hochwassertyps angepasst. Diese Vorgehensweise entspricht zunächst der saisonalen Statistik, wie sie im DWA-Merkblatt M-552 vorgeschlagen wird (DWA, 2012), wobei anstelle von saisonalen Verteilungen, in denen verschiedene Hochwassertypen auftreten können, nunmehr die Hochwassertypen selbst und damit die Hochwasserentstehung stärker berücksichtigt werden. Demzufolge wurde für jeden Hochwassertyp R1, R2, R3, S1 und S2 eine Verteilungsfunktion angepasst. Es wurden somit $n_{\tau} = 5$ verschiedene Stichproben betrachtet:

 $X_{1;j}$,..., $X_{N_j;j}$, $j = 1,..., n_t$, wobei N_j die Anzahl an Hochwasserereignissen des Typs j ist. In jeder Stichprobe sollte eine Mindestanzahl von zehn Ereignissen enthalten sein ($N_j \ge 10$), um die statistische Unsicherheit nicht zu groß werden zu lassen (FISCHER & SCHUMANN, 2023). Kleinere Stichproben können dem nächstähnlichen Hochwassertyp zugeordnet werden, z. B. R3 zu R2 oder S1 zu S2.

Unter "Hochwasser" wird in der Hydrologie die "zeitweilige Überschreitung eines Schwellenwertes" verstanden (DIN 4049). Dieser Schwellenwert dient dazu, nicht jeden Abflussanstieg im Mittel- oder Niedrigwasserbereich als ein Hochwasser zu klassifizieren. In den automatisch aufbereiteten Stichproben sind alle deutlichen Abflussanstiege als Hochwasserbeginn ausgewiesen, womit auch Ereignisse mit kleinen Scheiteln ausgewählt werden. Für die Hochwasserstatistik sollte jedoch entsprechend der o.g. Definition ein Mindestabfluss festgelegt werden, um Ereignisse auszuwählen, die für die Hochwasserstatistik relevant sind. Daher wurde ein typspezifischer Schwellenwert u, definiert und nur Hochwasserscheitel $X_{i,i} > u_i$ über diesem Schwellenwert wurden in der jeweiligen Stichprobe berücksichtigt. Man erhält im Endeffekt fünf partielle Serien, eine für jeden Hochwassertyp. Der Schwellenwert kann beispielsweise gemäß der Definition von DYCK (1980) für Hochwasser als das Vielfache des langjährigen mittleren Abflusses gewählt werden. Hier wurde $u_i = 3MQ_i$ gewählt (FISCHER, 2018), wobei sich das typspezifische MQ aus der gewichteten Mittelung der mittleren monatlichen Abflüsse

ergibt. Die Gewichtung erfolgt mit den relativen Häufigkeiten, mit denen der jeweilige Hochwassertyp *j* in jedem Monat auftritt. Für die Verteilung der Hochwasserscheitel über dem Schwellenwert wurde für jeden Hochwassertyp die Generalisierte Pareto-Verteilung gewählt, da diese die statistische asymptotische Verteilung der partiellen Serie darstellt (Balkeema-De Haan-Theorem; BALKEEMA & DE HAAN, 1974):

$$F_{j}(x) = \left(1 - \left(1 + \kappa_{j}\left(\frac{x - u_{j}}{\beta_{j}}\right)\right)^{\frac{-1}{\kappa_{j}}}\right).$$
(1)

Der typspezifische Formparameter $\kappa_i \in \mathbb{R}$ beschreibt dabei die Form der Verteilungsfunktion, während der typspezifische Skalenparameter β_i die Variabilität der Verteilung beschreibt. Es gilt $x > u_r$ falls $\kappa_i > 0$, und $u_i < x < u_i - \beta_i I \kappa_r$ falls $\kappa_i < 0$.

Die jährliche Verteilung des jeweiligen Hochwassertyps kann dann über das Poisson-Modell bestimmt werden:

$$F_{j;Jahr}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_j^k}{k!} (F_j(x))^k,$$
(2)

wobei sich der Parameter der Poisson-Verteilung, λj , aus der mittleren Häufigkeit des Hochwassertyps j pro Jahr ergibt. k ist dabei die Anzahl an Ereignissen pro Jahr und wird über den gesamten Wertebereich variiert. Bei der Kombination von GPD und Poisson-Verteilung, dem s. g. Poisson-Pareto-Modell, ergibt sich dann wieder eine GEV-Verteilung (WANG, 1991). So können auch für partielle Serien Jährlichkeiten ermittelt werden.

Somit erhält man fünf verschiedene Verteilungen, eine für jeden Hochwassertyp und jeweils auf das Jahr bezogen. Wird nun ein bestimmter Scheitelabfluss betrachtet, so können diesem, in Abhängigkeit von den Hochwassertypen, sehr unterschiedliche Jährlichkeiten zugewiesen werden. Diese Vorgehensweise wird hier am Beispiel des Pegels Marienthal/Regen erläutert. Dieses Einzugsgebiet hat eine Größe von 2.613 km², eine mittlere Höhe von 597 m ü. NN und liegt im bayerischen Naturraum "östliche Mittelgebirge". Betrachtet man für diesen Pegel einen Hochwasserscheitel von 750 m³/s, so hat dieser Scheitel eine Jährlichkeit von rund 180 Jahren, wenn man ihn der Stichprobe der Starkregenhochwasser (R1) zuordnet, jedoch eine Jährlichkeit von 8.100 Jahren, wenn man stattdessen vom Typ S1 (Regen-auf-Schnee-Hochwasser) ausgeht (Tab. 1). Unter Schneebedingungen ist es folglich deutlich unwahrscheinlicher, dass ein solcher

Hochwasserscheitel auftritt oder überschritten wird, wogegen starkregenbedingte Hochwasser mit deutlich höherer Wahrscheinlichkeit zu einer Überschreitung dieses Scheitels führen können. Zudem unterscheiden sich die typspezifischen Hochwasser entsprechend ihrer Definition auch in ihren Füllen und Dauern. Durch Anwendung der multivariaten Statistik können Copulas (KLEIN et al., 2011; SALVADORI & DE MICHELE, 2004) genutzt werden, um für einen gegebenen Hochwasserscheitel die zugehörige Fülle und deren Wahrscheinlichkeit zu bestimmen. So kann z. B. eine gemeinsame Copula an die Scheitel-Füllen Paare der Regenhochwasserereignisse eines Pegels angepasst und für eine gegebene Jährlichkeit des Scheitels die bedingte Wahrscheinlichkeit der zugehörigen Fülle ermittelt werden. Diese Fülle kann dann mithilfe der Hochwasserzeitskale einem Hochwassertyp zugeordnet werden. Für den Pegel Marienthal ergibt sich beispielsweise mit GEV-Marginalverteilungen und der BB1-Copula, ausgewählt über das AIC-Kriterium, dass ein Hochwasserscheitel von 750 m³/s am wahrscheinlichsten mit einer Hochwasserfülle im Bereich von 100 bis 200 Mio. m³ einhergeht (Wahrscheinlichkeit 62,7 %) und somit am ehesten im Zusammenhang mit Typ R2 auftritt (Wahrscheinlichkeit 55 %). Der gleiche Scheitel tritt mit geringeren Wahrscheinlichkeiten mit Ereignissen vom Typ R1 (26 %) oder vom Typ R3 (19 %) auf (Abb. 3). Dies ist nur ein erläuterndes Beispiel für die Vorteile, welche die Kombination von Hochwassertypen und Copulas bringen kann. Denkbar sind auch typspezifische Copulas, welche unterschiedliche Abhängigkeitsstrukturen zwischen den Hochwassertypen berücksichtigen, wie später in diesem Beitrag dargestellt.

Während die separate statistische Betrachtung der Hochwassertypen eine Differenzierung der Ereignisse sowie eine Unterscheidung der Hochwassermerkmale ermöglicht, ist für die hydrologische Praxis dennoch eine gesamtheitliche Betrachtung aller Hochwassertypen erforderlich. Dazu wurde ein Mischungsmodell verwendet (FISCHER 2018; FISCHER et al., 2019):

Das typbasierte Mischungsmodell partieller Serien (TMPS-Modell) kombiniert die Verteilungen der einzelnen Hochwassertypen in einem multiplikativen Mischungsmodell. Dazu wird die typspezifische Verteilung der Scheitel über dem Schwellenwert $u_{j'}F_{j'}$ mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit des Schwellenwertes,

$$1 - G_i(u_i), \tag{3}$$

multipliziert. Die Verteilungsfunktion G_j beschreibt die Verteilung aller Hochwasserscheitel des Typs *j*, d. h. sowohl über- als auch unterhalb des Schwellenwertes, und wird über die Generali-

Tabelle 1

Überschreitungswahrscheinlichkeiten sowie entsprechende Jährlichkeit (in Klammern) eines Hochwasserscheitels mit 750 m³/s für verschiedene Typ-Verteilungen am Pegel Marienthal/Regen. N_j gibt die Anzahl von Ereignissen des j-ten Hochwassertyps an. Exceedance probability and return period (in brackets) of a flood peak with 750 m³/s for different type-specific distributions at the Marienthal/Regen gauge. N_i gives the number of events of the j-th flood type.

Überschreitungswahrscheinlichkeit (Jährlichkeit)							
Scheitel 750 m ³ /s	R1	R2	R3	S1	S2		
	N ₁ = 116	N ₂ = 37	N ₃ = 33	N ₄ = 92	N ₅ = 19		
Р _Ü (Т)	0,0055 (183)	0,0035 (283)	0,0016 (642)	0,0001 (8086)	0 (∞)		



Abbildung 3

Hochwasserscheitel und mittels Copula bestimmte zugehörige Hochwasserfülle sowie deren bedingte Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des dominanten Hochwassertyps für ausgewählte Jährlichkeiten von 2, 5, 10, 20, 50, 100 (schwarze Linie = 750 m³/s), 200 und 500 Jahren am Pegel Marienthal/Regen.

Flood peak and associated flood volume determined by means of copula as well as their conditional probability under consideration of the dominant flood type for selected return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100 (black line = 750 m^3 /s), 200 and 500 years at Marienthal/Regen gauge.

sierte Extremwertverteilung (GEV) modelliert. Das TMPS-Modell gewichtet somit die Wahrscheinlichkeit der großen Hochwasserscheitel über dem Schwellenwert u_j mit der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Schwellenwertes. Die Verteilungsfunktion des TMPS-Modells ergibt sich zu

$$H(x) = \prod_{j=1}^{n} \left(F_{j}(x;\theta_{j},u_{j})(1-G_{j}(u_{j})) + G_{j}(u_{j}) \right)$$

$$= \prod_{j=1}^{n} \left(\left(1 - \left(1 + \kappa_{j} \left(\frac{x - u_{j}}{\beta_{j}} \right) \right)^{\frac{-1}{\kappa_{j}}} \right) \left(1 - \exp\left(- \left(1 + \xi_{j} \frac{u_{j} - \mu_{j}}{\sigma_{j}} \right)^{-\frac{1}{\xi_{j}}} \right) \right) + \exp\left(- \left(1 + \xi_{j} \frac{u_{j} - \mu_{j}}{\sigma_{j}} \right)^{\frac{-1}{\xi_{j}}} \right) \right) \right) + \left(4 \right)$$

Sie stellt die gemeinsame jährliche Verteilung aller Hochwassertypen dar. Da in der Hochwasserstatistik das Maximum aller Ereignisse und somit aller Hochwassertypen pro Jahr von Interesse ist, wurde für das TMPS-Modell unter Annahme voneinander unabhängiger Hochwassertypen ein multiplikatives Mischungsmodell gewählt (FISCHER et al., 2019).

Dieses Modell stellt eine Generalisierung des saisonalen hochwasserstatistischen Modells dar, wobei anstelle der Hochwasser in den verschiedenen Jahreszeiten nunmehr die tatsächlichen Hochwasserentstehungsbedingungen berücksichtigt werden. Das TMPS-Modell besitzt somit $n_t \cdot 6$ Parameter. Der Parameter u_{f} der typspezifische Schwellenwert, wird empirisch aus den täglichen mittleren Abflussdaten geschätzt. Somit verbleiben $n_t \cdot 5$ Parameter des Modells, die geschätzt werden würden. Dies geschieht für jeden Hochwassertyp separat mittels der L-Momentenschätzung, welche für kleine Stichproben effizient und robust ist.

4.2 Vergleich von AMS- und TMPS-Modell

Für die praktische Anwendung stellt sich die Frage, inwieweit sich die Ergebnisse der Anwendung des TMPS-Modells von denen der üblicherweise verwendeten statistischen Modelle der Hochwasserstatistik ohne Differenzierung in Hochwassertypen unterscheiden. Die Betrachtung von Jahreshöchstabflüssen ist die gebräuchlichste Vorgehensweise in der Hochwasserstatistik. Es war deshalb naheliegend, die Hochwasserquantile bei Anwendung des TMPS-Modells mit denen, die man durch die Anpassung einer Verteilung an die Jahreshöchstabflüsse erhält, zu vergleichen. Hierzu wurde eine GEV-Verteilung mittels L-Momenten an die Stichprobe der Jahreshöchstabflüsse (annual maximum series, AMS) angepasst. Zwei typische Ergebnisse dieses Vergleiches unter Berücksichtigung der typspezifischen Verteilungen sind in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4

Typbasiertes Mischungsmodell partieller Serien (TMPS-Modell), Jahreshöchstabflüsse (AMS) und typ-spezifische Verteilungen für die Pegel Marienthal/ Regen (a) und Fürstenfeldbruck/Amper (b). Es ist zu berücksichtigen, dass die hier dargestellten typspezifischen Verteilungen nicht deren relative Häufigkeiten im Vergleich zu den anderen Hochwassertypen berücksichtigen, die in das TMPS-Modell einfließen, sondern das Poisson-Pareto-Modell. *Type-based mixture model of partial duration series (TMPS model), annual maximum series (AMS) and type-specific distributions for the Marienthal/Regen (a) and Fürstenfeldbruck/Amper (b) gauges. It should be noted that the type-specific distributions shown do not consider the relative frequency of each flood type compared to all flood types which are considered in the TMPS model, but the Poisson-Pareto-model.* Für das zuvor erwähnte Beispiel des Pegels Marienthal/Regen, Reihenlänge von 100 Jahren, ergeben sich bis zu einer Jährlichkeit von ca. 100 Jahren nur relativ geringe Unterschiede des TMPS-Modells zum AMS-Modell (Tab. 3). Zum Beispiel liegt das HQ20 für das TMPS-Modell bei 550 m³/s und für das AMS-Modell bei 577 m³/s. Dieser Unterschied wird mit steigender Jährlichkeit größer, da das TMPS-Modell einen steileren Anstieg (exponentiell unbegrenzt) der Verteilungsfunktion aufweist als das AMS-Modell. Die HQ100-Werte unterscheiden sich daher um 88 m³/s zwischen beiden Modellen, was einer Differenz von 12 % zum HQ100-Quantil der AMS entspricht.

Dieser Unterschied kann durch die bereichsweise unterschiedliche Dominanz der verschiedenen Verteilungen der Hochwassertypen erklärt werden (s. auch MUDERSBACH (2022) für den Fall der saisonalen Statistik). Die Hochwassertypen R1 und R2, assoziiert mit Starkregen und Dauerregen, bedingen die Form der TMPS-Verteilung im Bereich großer Jährlichkeiten. Hochwasser mit großen Scheiteln resultieren daher mit größerer Wahrscheinlichkeit aus diesen Typen. Die übrigen Hochwassertypen spielen in diesem Bereich nur eine geringe Rolle. Sie sind dagegen sehr relevant im Bereich der Jährlichkeiten bis zu etwa 10 Jahren, wo insbesondere Regen-auf-Schnee-Hochwasser (S1) die maßgebende Verteilung liefern.

Diese unterschiedliche Relevanz der Hochwassertypen erklärt auch die Form der Verteilung des TMPS-Modells, welches an Stellen, an denen der dominante Hochwassertyp wechselt, oftmals einen deutlichen Wechsel des Anstiegs aufweist (hier bei Jährlichkeiten von etwa 10 Jahren). Die für große Jährlichkeiten nicht mehr relevanten Hochwassertypen erhalten nur ein minimales Gewicht im TMPS-Modell und müssen folglich auch für die Berechnung von Hochwasserquantilen nicht mehr berücksichtigt werden.

Wie sind die festgestellten Unterschiede zwischen den Ergebnissen des AMS und des TMPS-Modells zu begründen? Diese Frage kann durch ein einfaches Rechenbeispiel beantwortet werden. Nehmen wir ein Hochwasser mit einem Scheitel von X m³/s. Das AMS-Modell weist diesem Hochwasserscheitel eine Jährlichkeit von 1.000 Jahren zu, das TMPS-Modell jedoch nur von 210 Jahren. Der Unterschied liegt in der nunmehr separaten Berücksichtigung der einzelnen Hochwassertypen im TMPS begründet. Zunächst sind da die Starkregen-Hochwasser (R1). Für diesen Hochwassertyp ergäbe sich hier eine Jährlichkeit von 500 Jahren für den besagten Hochwasserscheitel. Im statistischen Mittel treten folglich zwei Hochwasserereignisse, bei denen der Scheitel X überschritten würde, innerhalb von 1.000 Jahren auf. Analog hätten wir ein Dauerregen-Hochwasser (R2) mit einer Überschreitung in 1.000 Jahren. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit für die übrigen Typen sei hingegen deutlich geringer: nur einmal in 5.000 Jahren für den Typ R3 und vermutlich kein Ereignis dieser Größe bei den Schneehochwassern im selben Zeitraum. Zusammengenommen ergibt dies drei Ereignisse in 1.000 Jahren, welche den gegebenen Scheitel von 1.000 m³/s erreichen oder überschreiten. Der Wert X würde also eine Jährlichkeit von rund 330 Jahren bedeuten, was schon relativ ähnlich zu der Jährlichkeit des TMPS-Modells ist. Der verbleibende Unterschied kann durch den Einfluss der übrigen Hochwassertypen (R3, S1 und S2) erklärt werden, welche bei dem betrachteten Zeitraum von 1.000 Jahren nur eine geringe Rolle spielen. Würde man diesen Zeitraum erweitern, würden vereinzelt die selteneren Hochwasser dieser

Typen auftreten, die den Wert X überschreiten, wodurch sich die Jährlichkeit gegenüber dem AMS-Modell somit weiter verringert, sodass sich asymptotisch die Jährlichkeit von 210 Jahren für den Wert X bei Anwendung des TMPS-Modells ergeben würde. Dieses einfache Rechenbeispiel demonstriert den Unterschied zwischen AMS- und TMPS-Modell: Das TMPS-Modell berücksichtigt mehrere Optionen, dass der Scheitel X auftritt, das AMS-Modell macht hierzu keine Unterscheidung, da es von einer homogenen Stichprobe ausgeht. Dadurch werden implizit alle Hochwassertypen über den gesamten Wertebereich hinweg als gleich häufig betrachtet. Dies entspricht jedoch nicht der Realität, wie das Beispiel der Hochwasser am Pegel Marienthal/Regen demonstriert (Tab. 2). Die Verteilung der Schneeschmelzhochwasser (S2) hat hier eine konkave Form. Dies bedeutet, dass sich die Scheitel dieser Hochwasser einem oberen Grenzwert annähern (Probable maximum Flood, PMF; KIENZLER et al., 2015). Dies entspricht sowohl den Erfahrungen als auch den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die bei reinen Schneeschmelzhochwassern wirken. Eine zunehmende Schneehöhe, d. h. ein höheres Wasserdargebot, wird sich bei diesem Hochwassertyp nicht in entsprechend proportional hohen Scheitelabflüssen auswirken. Das Energiedargebot für die Schneeschmelze bedingt eine Begrenzung der täglich verfügbaren Abflussmenge und die Retention der Schneedecke bewirkt insbesondere bei großen Schneehöhen eine Vergleichmäßigung der Wasserabgabe. Die konvexen Verläufe der Verteilungsfunktionen der übrigen Hochwassertypen lassen nicht auf einen oberen Grenzwert, d. h. ein PMF, schließen.

Nicht immer resultiert das TMPS-Modell in größeren Hochwasserquantilswerten als die der jährlichen Verteilung der Hochwassertypen, wie das in Tabelle 2 und Abbildung 4b dargestellte Beispiel des Pegels Fürstenfeldbruck/Amper, Reihenlänge von 100 Jahren, belegt. Das Einzugsgebiet des Pegels hat eine Größe von 1.230 km² mit einer mittleren Gebietshöhe von 744 m ü. NN und liegt im Alpenvorland. Für diesen Pegel dominieren die Starkregenhochwasser (R1) den Bereich der Jährlichkeiten über 50 a. Die übrigen Hochwassertypen gleicher Jährlichkeit sind dagegen in diesem Bereich wesentlich kleiner. Das Mischungsmodell TMPS berücksichtigt alle Hochwassertypen sowie deren relative Häufigkeit, was in kleineren Hochwasserquantilswerten für dieselbe Jährlichkeit im Vergleich zur jährlichen Verteilung des Hochwassertyps R1 resultiert, welche die Häufigkeit des Typs relativ zu den übrigen Hochwassertypen unberücksichtigt lässt. Generell tritt dieses Phänomen eines einzigen dominierenden Hochwassertyps mit Quantilen größer als das TMPS-Modell allerdings nur selten auf. Es war in ca. 20 % aller untersuchten Einzugsgebiete in Deutschland und Österreich der Fall und betraf ausschließlich den Typ R1.

Diese Beispiele zeigen, dass durchaus große Unterschiede zwischen AMS- und TMPS-Modell auftreten können. Drei wesentliche Aspekte wurden dabei beobachtet:

- Ein ungleichmäßiger Verlauf der Mischverteilung ("Knick") ist durch einen Wechsel des dominanten Hochwassertyps bedingt.
- Es ergeben sich Unterschiede zwischen den Quantilen der AMS- und TMPS-Verteilungen mit wechselnden Vorzeichen für bestimmte J\u00e4hrlichkeitsbereiche.
- Höhere Hochwasserquantilwerte für größere Jährlichkeiten werden oftmals durch die Besonderheiten der Verteilung der durch Starkregen verursachten Hochwasser bedingt (Typ R1).

Tabelle 2

Hochwasserquantile des TMPS-Modells, des AMS-Modells und der einzelnen jährlichen Typ-Verteilungen für ausgewählte Jährlichkeiten für die Pegel Marienthal/Regen und Fürstenfeldbruck/Amper. Die prozentualen Abweichungen (in Klammern) beziehen sich auf das jeweilige Quantil des AMS-Modells.

Jährlichkeit (a)	AMS	TMPS	R1	R2	R3	S1	S2
Marienthal/Regen							
5	385,3	444 (15 %)	231 (-40 %)	161 (-58 %)	165 (-57 %)	271 (-30 %)	132 (-66 %)
10	462,4	487 (5 %)	305 (-34 %)	235 (-49 %)	251 (-46 %)	337 (-27 %)	299 (-35 %)
20	538,2	577 (7 %)	389 (-28 %)	317 (-41 %)	334 (-38 %)	395 (-27 %)	382 (-29 %)
50	639,4	715 (12 %)	518 (-19 %)	442 (-30 %)	44 (-31 %)	465 (-27 %)	435 (-32 %)
100	717,5	838 (17 %)	633 (-12 %)	552 (-23 %)	525 (-27 %)	513 (-28 %)	454 (-37 %)
200	797,3	983 (23 %)	766 (-4 %)	678 (-15 %)	608 (-24 %)	558 (-30 %)	464 (-42 %)
Fürstenfeldbruck/Amper							
5	71,4	63,5 (-11 %)	53,8 (-25 %)	44,1 (-38 %)	-	_	28,8 (-60 %)
10	83,8	80,4 (-4 %)	69,0 (-18 %)	55,3 (-34 %)	-	_	51,0 (-39 %)
20	97,3	94,8 (-2 %)	86,9 (-11 %)	66,6 (-32 %)	-	_	59,0 (-39 %)
50	117,4	117 (0 %)	117 (-1 %)	81,9 (-30 %)	-	_	62,5 (-47 %)
100	134,7	137 (2 %)	145 (8 %)	94,0 (-30 %)	_	_	63,4 (-53 %)
200	154,0	162 (5 %)	179 (16 %)	107 (-31 %)	-	_	63,8 (-59 %)

Flood quantiles calculated using the TMPS model, the AMS model and the individual annual type distributions for selected return periods for the Marienthal/ Regen and Fürstenfeldbruck/Amper aguaes. The percentage deviation refers to the respective quantile of the AMS model.

Um die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen AMS- und TMPS-Modell zu verdeutlichen, wurden für 154 Pegel aus unterschiedlichen Naturräumen in Bayern die Abweichungen der TMPS-Quantile von den Quantilen bei Anwendung der AMS berechnet und in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Klassifizierung der Naturräume für Bayern wurde durch das LfU Bayern veröffentlicht (www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm).

Die Mittelwerte der (vorzeichenbehafteten) relativen (d. h. auf das AMS-Quantil bezogenen) Abweichungen sind bei niedrigen Jährlichkeiten (5 und 10 Jahre) positiv und liegen in einzelnen Naturräumen bei bis zu ca. 20 %. Das heißt, hier ergibt das TMPS-Modell meist höhere Werte als das AMS-Modell. Die Unterschiede werden mit Ausnahme der Gebiete in den Naturräumen "Alpen" und "Alpenvorland" geringer mit zunehmender Jährlichkeit. Im Mittel tritt im Extrapolationsbereich (T = 200 a) keine Abweichung vom AMS-Modell auf. Über alle Pegel gemeinsam betrachtet liegt der Fehler jedoch nahe 0, d. h., positive und negative Abweichungen heben einander auf. Betrachtet man statt der Mittelwerte die Standardabweichungen, so ergeben sich in einzelnen Naturräumen (Alpenvorland, Südwestliche Mittelgebirge) Abweichungen im Bereich von +/- 20 %.

Auffällig ist zudem, dass für große Jährlichkeiten zumeist die Regenhochwasser, insbesondere Typ R1 und R2, dominieren, während die Schneehochwasser lediglich in den nord-bayrischen Mittelgebirgen zu großen Hochwassern führen können (Abb. 5). Gerade im Voralpenraum zeigt sich eine große Dominanz der Starkregenhochwasser, während nahe der Alpen die Ereignisse vom Typ R2 (Dauerregen-Hochwasser) zu höheren Scheitelabflüssen führen. Neben den beschriebenen Unterschieden hat das TMPS-Modell gegenüber der klassischen Hochwasserstatistik eine Reihe von Vorteilen. So ist es nunmehr möglich, dass bei vorgegebener Jährlichkeit die Hochwasserscheitel für verschiedene Typen von Hochwasserereignissen ermittelt werden, die auf verschiedenen meteorologischen Ursachen beruhen und sich demzufolge in Füllen, Dauern oder ganz allgemein in ihren Ganglinienformen voneinander unterscheiden. Man kann folglich das Bemessungshochwasser in verschiedene Szenarien unterteilen, die unterschiedlich wahrscheinlich sind. Das Bemessungshochwasser kann somit auf dieser neuen, erweiterten Informationsbasis plausibler gewählt werden. Zum Vergleich findet sich in FISCHER (2021) eine ausführliche Simulationsstudie, in welcher beschrieben wird, bei welchen Parameterszenarien das TMPS-Modells dem AMS-Modell vorzuziehen ist. Dort ist ebenfalls zu sehen, dass mit zunehmender Stichprobengröße die Größe des Unsicherheitsbereichs für AMS- und TMPS-Modell sich stark annähert und ab eine Stichprobengröße von 100 Jahren für das TMPS-Modell kleiner ist als für das AMS-Modell.

Es ist zu berücksichtigen, dass insbesondere in der Schätzung der Formparameter κ_i des TMPS-Modells eine gewisse Unsicherheit

Tabelle 3

Relative Unterschiede zwischen den Quantilen, die nach dem TMPS-Modell berechnet wurden, zu denen des AMS-Modells (Anwendung der GEV auf Jahreshöchstabflüsse). Die Mittelwerte wurden aus vorzeichenbehafteten relativen Abweichungen, bezogen auf die Quantile des AMS-Modells, berechnet.

Relative differences between quantiles calculated using the TMPS model from those of the AMS model (applying GEV to annual maximum flood peaks). Mean values were calculated from signed deviations, relative to the quantiles of the AMS model.

				Alpen					
	17 Pegel, A _{Eo} < 1.000 km ²			7 Pegel, 1.000 < A _{Eo} < 10.000 km ²					
	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	
Mittelwert	0,000	-0,058	-0,232	-0,275	0,037	0.030	-0,025	-0,028	
StandAbw.	0,111	0,124	0,185	0,205	0,087	0,070	0,070	0,100	
Max. Abw.	0,357	0,350	-0,543	-0,610	0,151	0,130	-0,122	-0,132	
Alpenvorland									
	25 Pegel, A _{ro} < 1.000 km ²				12 Pegel, 1.000 < A _{Fo} < 10.000 km ²				
	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	
Mittelwert	0,052	-0,029	-0,180	-0,210	0,027	-0,023	-0,048	-0,047	
StandAbw.	0,110	0,089	0,229	0,280	0,177	0,120	0,202	0,236	
Max. Abw.	0,268	-0,210	-0,498	-0,577	0,348	-0,202	0,444	0,521	
Östliche Mittelgebirge									
	28 Pegel, A _{eo} < 1.000 km ²			5 Pegel, 1.000 < A _{Eo} < 10.000 km ²					
	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	
Mittelwert	0,231	0,109	-0,069	-0,070	0,180	0,102	0,066	0,077	
StandAbw.	0,141	0,126	0,183	0,252	0,131	0,101	0,088	0,127	
Max. Abw.	0,532	0,396	0,395	0,710	0,333	0,239	0,168	0,233	
			Südwestlich	ne Mittelgebirge	/Stufenland				
		31 Pegel, A _E	o < 1.000 km²	1	14 Pegel, 1.000 < A _{Eo} < 10.000 km ²				
	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	
Mittelwert	0,219	0,141	-0,028	-0,051	0,365	0,291	0,133	0,181	
StandAbw.	0,192	0,171	0,183	0,210	0,202	0,155	0,137	0,183	
Max. Abw.	0,702	0,608	-0,433	0,501	0,694	0,585	0,427	0,541	
Große Einzugsgebiete (AEo > 10.000 km²)									
	5 Pegel, Main			10 Pegel Donau/Inn					
	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	T = 5a	T = 10a	T = 100a	T = 200a	
Mittelwert	0,191	0,137	0,060	0,073	0,022	0,004	-0,007	0,012	
StandAbw.	0,157	0,154	0,213	0,227	0,116	0,086	0,099	0,101	
Max. Abw.	0,364	0,321	0,343	0,384	-0,233	0,141	0,159	0,152	
Alle analysierten Einzugsgebiete (154 Pegel)									
	T = 5a		T =	T = 10a		T = 100a		T = 200a	
Mittelwert	0	,146	0,071		-0,062		-0,0	-0,070	
StandAbw.	0	,187	0,163		0,204		0,249		
Max. Abw.	0	,702	0,	508	0,	543	0,	710	

bei kleinen Stichproben auftreten kann. Dies beeinflusst dann insbesondere den Bereich großer Jährlichkeiten. Um einen Eindruck über die Streubreite dieses Parameters zu erhalten, wurde ausgewertet, an wie vielen Pegeln das Vorzeichen der Konfidenzgrenzen dieses Parameters wechselt. Für R1-Hochwasser war dies bei ca. 20 % der betrachteten Pegel der Fall, bei R2-Hochwassern bei 34 %, bei R3-Hochwassern bei 39 %, bei S1-Hochwassern bei 34 % und bei S2-Hochwassern bei 24 %. Natürlich hängt dies stark mit der Lage des Einzugsgebiets zusammen. Generell lässt sich aber feststellen, dass für die häufig maßgebenden Hochwasser für große Jährlichkeiten, die R1-Hochwasser, der Konfidenzbereich des Formparameters deutlich im positiven Bereich liegt. Derlei Unsicherheiten können auch mittels abgeleiteter Hochwasserstatistik aus einer Kombination von Wettergenerator und Niederschlag-Abfuss-Modell quantifiziert werden. Derlei Ansätze sind im Beitrag von HABERLANDT et al. des Teilprojektes 7 der SPATE-Forschungsgruppe in diesem Heft zu finden.

4.3 Hochwasserszenarien

Da jeder Hochwassertyp eine gewisse Streubreite an ereignisspezifischen Kriterien aufweist, lässt sich die Hochwassertypisierung auch nutzen, um jeweils typspezifische Ganglinienensembles zu generieren, welche diese typspezifischen Hochwassercharakteristika widerspiegeln (FISCHER & SCHUMANN, 2023). Auf Basis verschiedener Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wurden dazu zu gegebenen Hochwasserscheiteln und mittels Hochwasserzeitskala ermittelten Füllen verschiedene Ganglinien mit variierenden Anstiegs- und Rezessionszeiten ge-



Abbildung 5

Dominierender Hochwassertyp für verschiedene Jährlichkeiten in Bayern. Relative difference between the flood quantiles of the TMPS and AMS models as well as dominant flood type for different return periods in Germany and Austria.

neriert (Abb. 6). Für den Pegel Ansbach/Fränkische Rezat, Reihenlänge von 100 Jahren, ergibt sich beispielsweise, dass der wahrscheinlichste Typ (53,8 %) für ein HQ100 mit Scheitel 42,7 m³/s der Typ R1 ist, wobei ein Volumen von 3,9 Mio. m³ auftreten würde sowie Ganglinien mit generell steilem Anstieg und geringer Dauer. Relativ wahrscheinlich (23,1 %) sind ebenfalls noch Regen-auf-Schnee-Hochwasser mit gleichem Scheitelwert, bei denen das Volumen mit 7,2 Mio. m³ schon deutlich größer ist. Eher unwahrscheinlich sind dagegen R3-Hochwasser, welche dann aber mit 14,6 Mio. m³ das größte Volumen aufweisen würden. Aus den vielen generierten Ganglinien können anhand der beobachteten Ganglinien des jeweiligen Typs mittels multikriterieller Suchverfahren (z. B. TOPSIS; HWANG & YOON, 1981) die jeweils plausibelsten Formen ausgewählt werden.

Da insbesondere bei der Bemessung von Hochwasserrückhalteräumen nicht immer der höchste Hochwasserscheitel das inhaltsmaximierende Hochwasserereignis charakterisiert, kann eine solche typdifferenzierte Betrachtung der Bemessungshochwasser mit unterschiedlichen Szenarien und Ganglinien die Bemessungspraxis sinnvoll erweitern.

Während die hier bisher gezeigten Resultate ausschließlich für beobachtete Einzugsgebiete ermittelt wurden, ist prinzipiell auch eine typbasierte hochwasserstatistische Regionalisierung möglich und in Hinblick auf die je nach Ereignistyp unterschiedlich zur Hochwasserentstehung beitragenden Einzugsgebietseigenschaften auch sinnvoll. So können typspezifische homogene Gruppen hydrologisch ähnlicher Gebiete definiert werden, mittels derer dann die Verteilungsparameter des TMPS-Modells regionalisiert werden können (FISCHER & SCHUMANN, 2021b). Bei diesem Verfahren ist, wie bei nahezu allen Regionalisierungsansätzen, die unterschiedliche Beobachtungslänge sowie der Einfluss extremer Ereignisse in den Hochwasserreihen zu berücksichtigen.



Abbildung 6

Generierte typspezifische Ganglinienensembles für das HQ100 (42,7 m³/s) mit variierenden Volumina und Ganglinienformen für den Pegel Ansbach/ Fränkische Rezat (119 km²). Die obere Zahl gibt jeweils die Wahrscheinlichkeit des jeweiligen Hochwassertyps für ein solches Hochwasserereignis an, die schwarzen Linien zeigen exemplarisch typische Ganglinienformen für den jeweiligen Typ.

Generated type-specific hydrograph ensembles for HQ100 (43 m^3 /s) with varying volumes and hydrograph shapes for the Ansbach/Fränkische Rezat gauge (119 km^2). The upper figure in each case indicates the probability of the respective flood type for such a flood event, black lines display typical hydrograph shapes for each flood type.

5 Veränderungen der Häufigkeiten von Hochwassertypen über die Zeit

Die Verwendung von Hochwassertypen hilft nicht nur, die Hochwassergenesen in einem Einzugsgebiet besser zu verstehen, sie kann auch mögliche Veränderungen dieser Genesen über die Zeit aufdecken. Viele Klimastudien sowie der aktuelle IPCC-Bericht (IPCC, 2022) deuten darauf hin, dass insbesondere Starkregenereignisse in Mitteleuropa in ihrer Häufigkeit zunehmen, während in den Wintermonaten nur noch selten großflächige Schneedecken über mehrere Tage zu beobachten sind. Dies hat auch einen Einfluss auf die Hochwasser, deren Genesen sich verändern. Durch Betrachtung der Hochwassertypen kann dezidiert ermittelt werden, wie sich deren Häufigkeiten über die Zeit verändern. Dazu wurde ein Bruchpunkttest basierend auf der Gini-Differenz (Gini's Mean Difference) mit einem Signifikanzniveau von 5 % verwendet, welcher signifikante Unterschiede in den Zeiträumen zwischen dem Auftreten von Hochwasserereignissen gleichen Typs detektiert (FISCHER et al., 2019; GERSTENBERGER et al., 2020). Die Verwendung eines varianzbasierten Bruchpunkttestes erlaubt die Betrachtung von Änderungen der Häufigkeiten anstelle von Änderungen der Größe der Hochwasser, wie es bei klassischen Trendtests der Fall wäre. Im Ergebnis können dann die Stichproben vor und nach dem Bruchpunkt statistisch verglichen werden. Für die bereits zuvor untersuchten 154 Einzugsgebiete in Bayern ergaben sich signifikante Bruchpunkte für zahlreiche Pegel. Die Anzahl und Tendenz dieser Bruchpunkte – mehr oder weniger Ereignisse – unterscheiden sich jedoch stark zwischen den Hochwassertypen. Während für die Hochwassertypen R1 und R2 (Hochwasser ausgelöst durch Starkregen oder Dauerregen) zumeist eine Zunahme der Häufigkeit der Hochwasser zu beobachten ist (Abb. 7), nehmen Regen-auf-Schnee- sowie schneeschmelzbedingte Hochwasser (S1 und S2) in ihrer Häufigkeit tendenziell ab. Letzteres wurde auch in der gemeinsamen

Arbeit mit dem Teilprojekt 2 zu deutschlandweiten Hochwassern beobachtet (KRUG et al., 2020). Die Häufigkeit der R3-Hochwasser ändert sich nicht über die Zeit. Bei den R1-Hochwassern zeigt sich zumeist eine Zunahme ab dem Zeitraum 1965 bis 1975 für das Donaueinzugsgebiet bzw. eine Abnahme der Häufigkeit ab ca. dem Jahr 2000 in den Mittelgebirgen. Generell sind eher die Einzugsgebiete im Alpenvorland und im südlichen Mittelgebirge von einer Zunahme der Häufigkeit der R1-Hochwasser betroffen (Tab. 4). Zudem werden derartige Veränderungen eher in größeren Einzugsgebieten über 300 km² bis etwa 10.000 km² sichtbar. Hinsichtlich der R2-Hochwasser nimmt die Häufigkeit dieser Ereignisse nahe der Alpen seit dem Jahr 2000 ab, während sie dagegen im Bereich des Hauptflusses Donau seit 1970 zunimmt. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass sich in den großen Einzugsgebieten Hochwasser vom Typ R1 aus Teileinzugsgebieten durch sequentiellen Ablauf und Überlagerungen flussabwärts zu R2-Hochwassern verändern.

Die Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet in Bayern bestätigen folglich die angenommenen Änderungen der Klimaberichte, insbesondere hinsichtlich der Zunahme von Starkregen. Inwiefern sich die Zunahme in die Zukunft fortsetzt, kann jedoch nicht bestimmt werden. Stattdessen deuten Untersuchungen, die gemeinsam von den Teilprojekten 1 und 6 in der Forschungsgruppe durchgeführt wurden, daraufhin, dass oftmals hochwasserreiche und -arme Zeiträume insbesondere auch in Bayern auftreten (FISCHER et al., 2022), sodass sich zeitlich begrenzte Änderungen von Häufigkeiten ergeben. Dies wurde berücksichtigt, in dem mehrfache Bruchpunkttests angewendet wurden (unter Berücksichtigung der Bonferroni-Korrektur), verändert die Ergebnisse jedoch nicht wesentlich. Generell ist zu berücksichtigen, dass nicht für alle Einzugsgebiete ein identischer Beobachtungsbeginn vorlag, sodass einzelne Bruchpunkte an manchen Pegeln unentdeckt bleiben.



Abbildung 7

Signifikante Bruchpunkte in der Häufigkeit der Hochwasserereignisse verschiedener Hochwassertypen in Bayern. Significant change-points of the frequency of flood events of different flood types.

Tabelle 4							
Zusammenfassung der Einzugsgebiete mit einer signifikanten Zunahme der Häufigkeit von R1-Ereignissen.							
Summary of catchments with a significant increase in frequency of R1-floods.							
	Anzahl EZG in der Klasse	Davon signifikant	Signifikante EZG in Klasse				
Alpen	25	3	12 %				
Alpenvorland	48	12	24 %				
Östliche Mittelgebirge	32	2	5.90 %				
Südwestliche Mittelgebirge	49	9	17.30 %				
< 300 km ²	51	3	5.90 %				
300 bis 1.000 km ²	58	10	17.20 %				
1.000 bis 10.000 km ²	38	8	21.10 %				
> 10.000 km ²	16	5	31.25 %				

Die Änderungen in den Hochwassertypen haben auch Änderungen in der Hochwasserstatistik zur Folge. Beispielsweise wurde für den Pegel Achsheim/Schmutter, Reihenlänge von 54 Jahren, eine signifikante Zunahme der R1-Hochwasser ab ca. 1975 nachgewiesen (Abb. 8). Betrachtet man die Verteilung dieses Typs vor und nach dem Bruchpunkt, so ist eine deutliche Erhöhung der Quantile insbesondere für große Jährlichkeiten zu beobachten. Dies wirkt sich dementsprechend auch auf das TMPS-Modell aus, welches sich jedoch in geringerem Maße ändert, da die übrigen typspezifischen Verteilungen unverändert bleiben (Annahme der Stationarität). Die Verteilung der Jahreshöchstabflüsse (AMS) hingegen verändert sich stark, da eine Differenzierung in die Hochwassertypen nicht vorgenommen werden kann. Jedoch können sich Zu- und Abnahmen der Häufigkeiten verschiedener Hochwassertypen auch ausgleichen, wenn z. B. die Schneehochwasser abnehmen und die R1-Hochwasser zunehmen. In den Jahreshöchstabflüssen bleibt dies unentdeckt.

Verwendung von Hochwassertypen zur 6 räumlichen Betrachtung von Hochwassern

Hochwassertypen beinhalten auch im räumlichen Kontext wesentliche Informationen, um die räumliche Interaktion von zeitgleichen Hochwassern in großen Flussgebieten besser zu verstehen und zu charakterisieren. Verändert sich beispielsweise der Hochwassertyp eines Hochwassers flussabwärts, so lässt diese Änderung auf die Art der Wellenfortpflanzung schließen: flacht die Welle ab, so erhöht sich die Zeitskale (das Verhältnis Volumen zu Scheitel) und dementsprechend auch der Hochwassertyp. Eine Überlagerung zeitgleicher Hochwasser aus Haupt- und Nebenfluss hingegen kann flussabwärts zu einem höheren Scheitel führen oder sogar den Hochwassertyp von einem Schnee- zu einem Regenhochwasser verändern. Die Wahrscheinlichkeit einer Überlagerung hängt dabei ebenfalls stark vom Hochwassertyp ab. Während zeitgleiche R3-Hochwasser sich aufgrund ihrer langen Dauer häufig überlagern, was allerdings mit vergleichsweise geringen Effekten auf den Hochwasserscheitel verbunden ist, überlagern sich R1-Hochwasser eher selten. Das hat dann aber oft eine deutliche Erhöhung des Scheitels zur Folge. Durch die Betrachtung der Hochwassertypen im räumlichen Kontext kann auch der Einfluss bestimmter Teileinzugsgebiete für die Hochwassergenese flussabwärts bestimmt werden. So schlagen FISCHER & SCHUMANN (2021a) beispielsweise die Nutzung typspezifischer Vine-Copulas vor, um die Zusammenhänge zwischen zeitgleichen Hochwassern an mehreren Pegeln in einem Flussgebiet zu modellieren. Dazu wurden abhängig vom Hochwassertyp unterschiedliche Copula-Modelle und somit Abhängigkeitsstrukturen gewählt und mögliche Kombinationen



Abbildung 8

Verteilung der Hochwassertypen, des TMPS-Modells und der Jahreshöchstabflüsse vor und nach dem Bruchpunkt im Jahr 1975. Distribution of the flood types, the TMPS model and the annual maximum series before and after the change-point in 1975.

der Hochwasserscheitel und Hochwassertypen flussaufwärts in ihrer Wahrscheinlichkeit ermittelt, die zu einem Hochwasserereignis vorgegebener Jährlichkeit flussabwärts führen könnten. Die Vorteile dieser Betrachtung, nämlich die typspezifische Szenarienermittlung für Hochwasser bestimmter Jährlichkeit, wird nachfolgend an einem Beispiel für den Rhein verdeutlicht.

Der Rhein ist eine der wichtigsten Wasserstraßen Europas und entwässert große Teile Deutschlands. Mit seinen zahlreichen, teils sehr großen, Nebenflüssen, stellt das Flussgebiet des Rheins, welches von den Alpen über Mittelgebirge bis hin zu flachen Regionen im unteren Lauf reicht, ein komplexes Flussnetzwerk dar (KHR, 1978). Um Rheinhochwasser in Deutschland zu charakterisieren und statistisch zu modellieren, wurde als Zielpegel Andernach am Mittelrhein gewählt. Zudem wurden die Pegel Maxau und Worms am Oberrhein (vor dem Zufluss des Mains), sowie Kaub am Mittelrhein (vor dem Zufluss der Mosel) betrachtet. Mithilfe der Daten des Pegels Cochem sollte der Einfluss des Nebenflusses Mosel auf die Hochwasserverhältnisse in Andernach bewertet werden. Mittels des erwähnten Copula-Modells und unter Berücksichtigung dreier Typen des räumlichen Schwerpunktes der Hochwasserentstehung (Mosel, Alpen oder Mischtyp) konnten dann für verschiedene Kombinationen von Hochwassertypen Szenarien für das HQ100 bestimmt werden (Abb. 9). So wurde berechnet, dass das HQ100 in Andernach am wahrscheinlichsten (13,8 %) aus einem R2-Hochwasser am Pegel Andernach resultiert, das aus einer Kombination von R2-Hochwassern an den flussaufwärts-gelegenen Pegeln zusammen mit einem bezogen auf die Einzugsgebietsfläche deutlich



Abbildung 9

Hochwasserszenarien und zugehörige Wahrscheinlichkeit für das HQ100 am Pegel Andernach/Rhein unter Berücksichtigung des Hochwassertyps flussaufwärts und des Schwerpunktes der Hochwasserentstehung. Die Abbildung wird wie folgt gelesen: das wahrscheinlichste Szenario für ein HQ100 am Pegel Andernach/Rhein, mit einer Wahrscheinlichkeit von 13.8 %, ergibt sich aus einer Kombination von R2-Hochwassern, sowohl am Pegel Andernach, als auch an den flussaufwärts gelegenen Pegeln Cochem und Kaub (als Zusammenfluss gemeinsam modelliert) sowie Worms und Maxau (R2|R2R2|R2|R2) mit einem Schwerpunkt des Ereignisses in der Mosel.

Flood scenarios and associated probability for HQ100 at the Andernach/ Rhine gauge considering the flood type upstream and the centre of flood emergence. The figure reads as follows: the most probable scenario for a 100-year flood at Andernach/Rhine gauge, with a probability of 13.8%, is obtained from a combination of R2-floods, for Andernach gauge as well as the Cochem and Kaub (modelled jointly due to confluence) and the Worms and Maxau upstream gauges (R2|R2R2|R2|R2) with a focus point in the Moselle tributary. überproportionalen Zufluss aus der Mosel auftritt. Details zu dem Beispiel sind FISCHER und SCHUMANN (2021a) zu entnehmen, wo zudem auch ein Beispiel für die Donau gegeben wird. Generell wurde der Beitrag der Mosel als sehr wesentlich für die Entstehung großer Hochwasser am Rhein bei Andernach ermittelt. Große Hochwasserscheitel in der Mosel begünstigen die Entstehung extremer Hochwasser flussabwärts im Rhein. Reine alpine Hochwasser im Oberrhein spielen nahezu keine Rolle für extreme Hochwasser flussabwärts. Aufgrund dieser Betrachtung kann somit die Entstehung von Hochwassern in großen Flussgebieten nachvollzogen werden, um plausible Hochwasserszenarien mit Wahrscheinlichkeitsaussage zu erhalten.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojektes 1 "Hydrologie extremer Hochwasser - Ereignisanalyse" der SPATE-Forschungsgruppe wurde das Potenzial der Berücksichtigung von Hochwassertypen in der Hochwasserstatistik untersucht. Hochwassertypen dienen nicht nur zur Unterscheidung von Hochwasserereignissen hinsichtlich ihrer meteorologischen Entstehungsprozesse bzw. ihrer Ganglinienform, sondern können auch wichtige Informationen für die Hochwasserstatistik und somit die Bemessungspraxis liefern. Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, wie unterschiedlich die Hochwassertypen in Deutschland und Österreich und ihre Rolle in der Entstehung extremer Hochwasser ist. Dazu wurden eine automatisierte Hochwasserseparation sowie eine hybride ganglinienbasierte Hochwassertypologie für 263 Einzugsgebiete angewendet. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen die Anwendung für eine Auswahl von 154 Pegeln in Bayern sowie den Rhein. Resultate für weitere Einzugsgebiete sind in FISCHER et al. (2019) und BRUNNER und FISCHER (2022) zu finden. Es konnte abgeleitet werden, dass Starkregenhochwasser insbesondere im Alpenvorland in den letzten Jahrzehnten in der Häufigkeit zunehmen, während Schneehochwasser allgemein seltener auftreten. In einem zweiten Schritt wurden die Hochwassertypen in ein statistisches Mischungsmodell zur Verwendung in der Hochwasserstatistik integriert. Es wurde demonstriert, wie die einzelnen Hochwassertypen den Verlauf der Verteilungsfunktion über verschiedene Jährlichkeiten beeinflussen. Unterschiede zur klassischen Hochwasserstatistik auf Basis der Jahreshöchstabflüsse ergeben sich hauptsächlich im unteren Jährlichkeitsbereich für die Mittelgebirge sowie im oberen Jährlichkeitsbereich für das Alpenvorland. Mittels der Hochwassertypen konnten zudem verschiedene Hochwasserszenarien für Bemessungshochwasser ermittelt werden, welche verschiedene Ganglinienformen und Füllen berücksichtigen. Mittels dieser Szenarien können Bemessungsfälle plausibilisiert und um weitere Aspekte als lediglich den Hochwasserscheitel ergänzt werden. Abschließend wurde der Nutzen von Hochwassertypen für die räumliche Hochwasserstatistik demonstriert, da mit deren Hilfe die Entstehung und Fortpflanzung von Hochwassern in großen Flussgebieten charakterisiert und modelliert werden kann. So können auch für große Flussgebiete Hochwasserszenarien in Abhängigkeit der Zuläufe erstellt und somit die Wirksamkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen im Gebiet geprüft werden.

Die Berücksichtigung von Hochwassertypen in der Hochwasserstatistik bietet somit die Möglichkeit, deterministisches Wissen zur Hochwasserentstehung in die Statistik und somit die Bestimmung von Bemessungshochwassern einfließen zu lassen. Die enthaltene Information kann folglich wesentlich erweitert werden. Dies ermöglicht neue Ansätze im Hochwasserschutz sowohl lokal an einem einzigen Pegel als auch räumlich in großen Flussgebieten.

Conclusions

Within the framework of sub-project 1 "Hydrology of extreme floods - event analysis" of the SPATE research unit, the potential of considering flood types in flood statistics was investigated. Flood types are not only used to distinguish flood events with regard to their meteorological formation processes or their hydrograph shape but can also provide important information for flood statistics and thus for design practice. The investigations presented here show how different the flood types are in Germany and Austria and their role in the development of extreme floods. For this purpose, an automated flood separation and a hybrid hydrograph-based flood typology were applied for 263 catchments. The presented results demonstrate the application to 154 catchments in Bavaria and the Rhine River. Results for more catchments can be found in FISCHER et al. (2019) and BRUNNER and FISCHER (2022). It could be deduced that heavy rainfall floods, especially in the Alpine foothills, have increased in frequency in recent decades, while snow floods generally occur less frequently. In a second step, the flood types were integrated into a statistical mixture model for use in flood statistics. It was demonstrated how the individual flood types influence the course of the distribution function over different annualities. Differences to the classical flood statistics based on the annual maximum flows are mainly found in the lower annuality range for the low mountain ranges and in the upper annuality range for the Alpine foothills. Using the flood types, it was also possible to determine various flood scenarios for design floods, which take into account different hydrograph shapes and fills. By means of these scenarios, design cases can be made more plausible and supplemented by other aspects than just the flood peak. Finally, the usefulness of flood types for spatial flood statistics was demonstrated, as they can be used to characterise and model the formation and propagation of floods in large river basins. In this way, flood scenarios can also be created for large river basins depending on the inflows and thus the effectiveness of flood protection measures in the area can be tested.

The consideration of flood types in the flood statistics thus offers the possibility of incorporating deterministic knowledge on flood generation into the statistics and thus the determination of design floods. The information contained can thus be significantly expanded. This enables new approaches in flood protection both locally at a single gauge and spatially in large river basins.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die während dieser Studie analysierten Datensätze sind frei zugänglich. Die Abflussdaten für Bayern sind verfügbar über den Gewässerkundlichen Dienst des LfU Bayern unter https://www. gkd.bayern.de/. Die Abflusszeitreihen für den Rhein entstammen dem GRDC-Datensatz "The Global Runoff Data Centre, 56068 Koblenz, Germany", verfügbar unter https://portal.grdc.bafg.de/. Der E-OBS-Datensatz für Niederschlags- und Temperaturdaten ist frei verfügbar unter https://www.ecad.eu/download/ensembles/ download.php.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojektes "Hydrologie extremer

Hochwasser – Ereignisanalyse" der Forschungsgruppe SPATE (FOR2416). Zudem danken die Autoren den Landesämtern (LfU Bayern, LfULG Sachsen, LAU Sachsen-Anhalt, NLWKN) für die Bereitstellung der Abflussdaten.

Anschriften der Verfasser

Dr. Svenja Fischer Prof. Dr. Andreas H. Schumann Ruhr-Universität Bochum Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland svenja.fischer@rub.de andreas.schumann@rub.de

Literaturverzeichnis

- BALKEEMA, A. A. & L. DE HAAN (1974): Residual Life Time at Great Age. The Annals of Probability, 2 (5).
- BARTENS, A., & U. HABERLANDT (2021): Flood frequency analysis using mean daily flows vs. instantaneous peak flows. – Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-25.
- BRUNNER, M.I., & S. FISCHER (2022): Snow-influenced floods are more strongly connected in space than purely rainfall-driven floods. – Environmental Research Letters, 17, 104038.
- DWA (2012): Merkblatt DWA-M 552 Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. -DWA-, Hennef.
- DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie. Bd. 1. Berechnung und Regelung des Durchflusses der Fluesse. – Verlag für Bauwesen.
- FISCHER, S. (2018): A seasonal mixed-POT model to estimate high flood quantiles from different event types and seasons. – Journal of Applied Statistics, 45 (15), 2831-2847.
- FISCHER, S. (2021): Comparison of annual maximum series and floodtype-differentiated mixture models of partial duration series. arXiv: 2111.13393v1.
- FISCHER, S., D. LUN, A. SCHUMANN, & G. BLÖSCHL (2022): Detecting flood-type-specific flood-rich and flood-poor periods in peaks-overthreshold series with application to Bavaria (Germany). – Stochastic Environmental Research and Risk Analyses.
- FISCHER, S., & A. SCHUMANN (2018): A distribution-free ordinal classification of floods based on moments. – Hydrological Sciences Journal 63 (11), 1605-1618.
- FISCHER, S., & A. SCHUMANN (2019): Spatio-temporal consideration of the impact of flood types on flood statistics. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 34, 1331–1351.
- FISCHER, S., & A. SCHUMANN (2021a): Multivariate Flood Frequency Analysis in Large River Basins Considering Tributary Impacts and Flood Types. – Water Resources Research, 57 (8).
- FISCHER, S., & A. SCHUMANN (2021b): Regionalisation of flood frequencies based on flood type-specific mixture distributions. – Journal of Hydrology X, 13.
- FISCHER, S., & A. SCHUMANN (2023): Generation of Type-Specific Synthetic Design Flood Hydrographs. – Hydrological Sciences Journal.
- FISCHER, S., A. SCHUMANN & P. BÜHLER (2019): Timescale-based flood typing to estimate temporal changes in flood frequencies. – Hydrological Sciences Journal, 64 (15), 1867-1892.
- FISCHER, S., A. SCHUMANN & P. BÜHLER (2021): A statistics-based flood event separation. – Journal of Hydrology X, 10, 100070.
- GAÀL, L., J. SZOLGAY, S. KOHNOVÀ, 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).

GERSTENBERGER, C.; D. Vogel & M. WENDLER (2020): Tests for Scale Changes Based on Pairwise Differences. Journal of the American Statistical Association, 115 (531), 1336-1348.

HWANG, C.-L., & K. YOON (1981): Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey. – Berlin – Heidelberg – New York 1981.

- IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Utrecht, Niederlande.
- KIENZLER, P., N. ANDRES, D. NÄF-HUBER & M. ZAPPA (2015): Herleitung extremer Niederschläge und Hochwasser im Einzugsgebiet des Sihlsees für einen verbesserten Hochwasserschutz der Stadt Zürich. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59 (2), 48–58.
- KLEIN, B., A.H. SCHUMANN & M. PAHLOW (2011): Copulas New Risk Assessment Methodology for Dam Safety. – In: Andreas Schumann (Ed): Flood Risk Assessment and Management. How to Specify Hydrological Loads, Their Consequences and Uncertainties. Springer, 470pp.
- KRUG, A., C. PRIMO, S. FISCHER, A. SCHUMANN & B. AHRENS (2020): On the temporal variability of widespread rain-on-snow floods. – Meteorologische Zeitschrift, 29 (2), 147 - 16.
- MACQUEEN, J.B. (1967): Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. – Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Band 1. – University of California Press, 281–297.

- 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 (6).
- MUDERSBACH, C. (2022): Anwendung und Bewertung der saisonalen Hochwasserstatistik in Deutschland – ein Diskussionsbeitrag. – WasserWirtschaft 11/2022.
- RANGO, A., & J. MARTINEC (1995): Revisiting the degree-day method for snowmelt computations 1. – JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 31(4), 657-669.
- ROSSI, F., M. FIORENTINO, & P. VERSACE (1984): Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. – Water Resources Research, 20 (7), 847-856.
- SALVADORI, G., & C. DE MICHELE (2004): Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. – Water Resources Research, 40 (12).
- SCHUMANN, A. H: (2005): Hochwasserstatistische Bewertung des Augusthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der saisonalen Statistik. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 49 (4), 200-206.
- TARASOVA, L., R. MERZ, A. KISS, S. BASSO, G. BLÖSCHL, R. MERZ, A. VIG-LIONE, S. PLÖTNER, B. GUSE, A. SCHUMANN, S. FISCHER, B. AHRENS, F. ANWAR, A. BÀRDOSSY, P. BÜHLER, U. HABERLANDT, H. KREIBICH, A. KRUG, D. LUN, H. MÜLLER-THOMY, R. PIDOTO, C. PRIMO RAMOS, J. SEIDEL, S. VOROGUSHYN & L. WIETZKE (2019): Causative classification of river flood events. – WIREs Water, 6 (4).
- WANG, Q.J. (1991): The POT model described by the generalized Pareto distribution with Poisson arrival rate. Journal of Hydrology, 129 (1-4), 263-280.