

András Bárdossy, Jochen Seidel & Faizan Anwar

Interdependenz von extremen Hochwasserabflüssen

Interdependence of Extreme Floods Peaks

Hydrologische Extreme wie Hochwasser und Starkniederschläge sind Phänomene, die einen ausgeprägten raum-zeitlichen Charakter aufweisen. In diesem Teilprojekt der SPATE Forschungsgruppe wurden Methoden entwickelt, die zu einem besseren Verständnis des Verhaltens und der Abhängigkeit von Niederschlag und Abfluss in Raum und Zeit beitragen. Für Einzugsgebiete in Deutschland und Österreich wurden die großräumigen Wetterlagen (CPs) identifiziert, deren Auftreten zu hohen Niederschlagsmengen führen können. Diese großräumigen Zirkulationsmuster, die nur auf den Luftdruckverhältnissen basieren, erklären das Auftreten großer Hochwasser jedoch nur teilweise, da der Zustand des Einzugsgebiets hierbei nicht berücksichtigt wird. Darüber hinaus wurden zwei Metriken entwickelt, die das gleichzeitige Auftreten von extremen Ereignissen beschreiben. Die eine basiert auf dem binären Verhalten der kombinierten Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Hochwasserereignissen, die andere auf der zeitlichen Variabilität ausgedrückt durch die Fourier-Transformation von Niederschlags- und Abflusszeitreihen. Die Ergebnisse zeigen, dass das gleichzeitige Auftreten von Extremereignissen in den hohen Frequenzen der Fourier-Kreuzkorrelationsspektren deutlich zu erkennen ist. Dieses Erkenntnis wurde verwendet, um neue Methoden für die Generierung von Niederschlags- und Abflusszeitreihen zu entwickeln, die die raum-zeitlichen Abhängigkeiten von Extremereignissen besser berücksichtigen.

Schlagwörter: Simultanes Auftreten von Extremen, Atmosphärische Zirkulationsmuster, Abhängigkeiten höherer Ordnung, Niederschlags-generator, Abflusszeitreihengenerator

Hydrological extremes such as strong precipitation and floods are phenomena which have distinct spatio-temporal features. In this sub-project of the SPATE research unit, tools were developed that lead to a better understanding of the behaviour and the dependencies of precipitation and discharge in space and time for events that cause extreme floods. Large-scale atmospheric circulation patterns (CPs) which are associated with high rainfall amounts were identified for catchments in Germany and Austria. However, the CPs which consider the atmospheric conditions only partly explain the occurrences of large floods since the state of the catchment is not considered. Furthermore, two metrics which explain the simultaneous occurrences of extreme events were developed. One is based on the binary behaviour of combined flood event exceedance probabilities and the other focusses on the temporal variability of discharge time series expressed by the Fourier transform of precipitation and discharge time series. The results show that the simultaneous occurrence of extreme events can be clearly seen in the high frequencies of the Fourier cross-correlation spectra. This was exploited to formulate new precipitation and discharge time series generators that were better suited to simulate simultaneous occurrences of extreme events.

Keywords: simultaneous occurrences of extremes, weather circulation patterns, higher-order dependence, multisite precipitation simulation, multisite discharge simulation

1 Einleitung

Hochwasser sind Extremereignisse, die durch räumliche Phänomene wie großflächige Niederschläge oder Schneeschmelze verursacht werden. Solche Ereignisse haben einen ausgeprägten raum-zeitlichen Charakter. So können beispielsweise Niederschlagsereignisse von unterschiedlicher Dauer, Intensität und räumlicher Ausdehnung zu Hochwasserereignissen derselben Größenordnung führen. Außerdem können Hochwasser in flussaufwärts gelegenen Teileinzugsgebieten zu Überschwemmungen in einem größeren flussabwärts gelegenen Einzugsgebiet führen, je nach zeitlicher Koinzidenz oder Komplementarität der Abflüsse, die mit den hochwasserauslösenden Ereignissen in Zusammenhang stehen. Traditionell wird die Häufigkeit des Auftretens von Hochwasser für Einzugsgebiete einzeln durch univariate Extremwertstatistiken behandelt. Die Bewertung des Hochwasserrisikos und ein wirksamer Hochwasserschutz könnten durch eine genauere Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Charakterisierung der hochwassererzeugenden Mechanismen erheblich verbessert werden. Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) war es, die raum-zeitlichen Abhängigkeiten von hochwasserrelevanten Variablen wie Nie-

derschlag und Abfluss zu untersuchen. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden neue Simulationsverfahren für die Generierung von Niederschlags- und Abflusszeitreihen entwickelt, die die raum-zeitlichen Abhängigkeiten von Extremereignissen besser berücksichtigen.

2 Datengrundlage

Für die vorliegende Studie wurden verschiedene hydroklimatologische Datensätze verwendet. Die Zeitreihen für täglichen und stündlichen Niederschlag und Temperatur wurden vom Open Data Server des Deutschen Wetterdienstes (DWD)¹ bezogen. Die hier verwendeten täglichen Niederschlagszeitreihen reichen von 1961 bis 2015, während die stündlichen Daten für den Zeitraum 2005 bis 2020 verwendet wurden. Diese beiden Datensätze wurden als Eingangsdaten für die Untersuchung von Abhängigkeitsstrukturen, für die Entwicklung von Niederschlagsgeneratoren sowie für Niederschlags-Abfluss-Modelle verwendet.

¹ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate

Für die Wetterlagenklassifizierung wurde der Datensatz der geopotentiellen Höhen (500 hPa) des National Center for Environmental Prediction – NCEP Reanalysis 1 (KALNAY et al., 1996) verwendet. Dieser tägliche Datensatz ist global für den Zeitraum ab dem Jahr 1948 verfügbar und hat eine räumliche Auflösung von 2,5°. Diese Luftdruckdaten wurden für den Zeitraum 1961 bis 2010 zur Klassifizierung von Wetterlagen verwendet, um Zirkulationsmuster (im Folgenden als CP (Circulation Pattern) bezeichnet) zu identifizieren, die für großflächige Niederschläge verantwortlich sind. Da für diese großräumigen europaweiten Analysen keine Niederschlagszeitreihen zur Verfügung standen, wurde hierfür ein gerasterter Niederschlagsdatensatz auf Tagesbasis (s. Beitrag HAMOUDA et al., 2023, diese HyWa-Ausgabe, Teilprojekt 2) mit einer räumlichen Auflösung von 0,11° verwendet.

Die täglichen und stündlichen Abflusszeitreihen für verschiedene Einzugsgebiete in Deutschland und Österreich wurden vom Global Runoff Data Center (GRDC)² und von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)³ bezogen. Diese wurden als Referenz für die Untersuchung von hochdimensionalen Abhängigkeitsstrukturen, die Generierung von Abflusszeitreihen und für die Kalibrierung von Niederschlags-Abfluss-Modellen verwendet.

3 Atmosphärische Zirkulationsmuster und Hochwasser

Atmosphärische Zirkulationsmuster können klassifiziert werden, um einen Zusammenhang zwischen groß- und kleinskaligen Variablen herzustellen. Die Lage von Hoch- und Tiefdruckgebieten in der Atmosphäre steht in engem Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge. Klassifikationen von Großwetterlagen sind weit verbreitet, um beispielsweise die vorherrschenden Luftdruckmuster in der Atmosphäre zu ermitteln, die für Dürren oder Hochwasser verantwortlich sind (BÁRDOSSY et al., 2002; HUTH et al., 2008; HOUSSOS et al., 2008; BÁRDOSSY, 2010; HOY et al., 2013; PRINGLE et al., 2014; SCHLEF et al., 2019; IBEUCHI, 2021). In der vorliegenden Studie wurde die von BÁRDOSSY et al. (1995) entwickelte Klassifikation verwendet, die verschiedene CPs mit Hilfe von Fuzzy Logic identifiziert. Dazu werden gerasterte Luftdruckdaten (geopotentielle Höhen oder Bodenluftdruck) benötigt, die zuerst in Druckanomalien für jeden Rasterpunkt umgerechnet werden. Mit Hilfe des Simulated Annealing Optimierungsschemas (KIRKPATRICK et al., 1983; ČERNÝ, 1985) werden Fuzzy-Regeln identifiziert, die die Luftdruckanomalien für jeden Zeitschritt einer bestimmten CP zuordnen. Als Zielfunktion für die Bestimmung der CPs wurden Zeitreihen von räumlich gemittelten Niederschlägen für verschiedene Einzugsgebiete verwendet. Die Idee ist, dass jede CP zu einem Niederschlag führen sollte, welcher sich so weit wie möglich vom mittleren Gesamtniederschlag unterscheidet. Dies geschieht durch die zufällige Zuweisung einer Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion zu einer zufällig ausgewählten Teilmenge von Punkten. Für jede CP wird eine Fuzzy-Regel bestimmt, so dass jedem Rasterpunkt eine Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion (z. B. hoher, mittlerer oder niedriger Luftdruck) zugewiesen werden kann. Dabei werden jeweils die Luftdruckanomalien betrachtet, d.h. die Abweichung des aktuellen Luftdrucks an einem Punkt zum entsprechenden

Mittelwert an diesem Punkt. Die CP, die den höchsten Erfüllungsgrad aufweist, wird dem jeweiligen Zeitschritt zugeordnet. Dann wird die Niederschlagsmenge für jede CP für verschiedene Schwellenwerte des Niederschlags verglichen. Wenn die daraus resultierende Klassifizierung für jede CP einen mittleren Niederschlag ergibt, der sich stärker vom mittleren Gesamtniederschlag unterscheidet als die vorherige Klassifizierung, wird sie akzeptiert, andernfalls wird sie abgelehnt. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden Schwellenwerte von 1, 10, 20 mm für den Gebietsniederschlag der betrachteten Einzugsgebiete verwendet. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis keine Verbesserung der Zielfunktion mehr erreicht wird. Da bei gerasterten Datensätzen eine sehr große Anzahl von Punkten zur Definition von CPs vorhanden sind, wurde die Anzahl der zu verarbeitenden Punkte mittels Hauptkomponentenanalyse reduziert (ROMERO et al., 1999). Anstatt alle 403 Gitterpunkte über Europa zu verwenden, wurden nur die 13 Punkte in die Klassifikation mit einbezogen, die 95 % der Varianz beschreiben.

Die CP-Zeitreihen wurden zunächst für die Einzugsgebiete von Elbe, Donau und Rhein unter Verwendung räumlich gemittelter Einzugsgebietsniederschläge basierend auf den Daten von HAMOUDA et al. (2023, diese HyWa-Ausgabe, Teilprojekt 2) berechnet. Die Klassifizierung erfolgte anhand der geopotentiellen Höhen aus dem NCEP-Datensatz für den Zeitraum von 1961 bis 2010 auf täglicher Basis für das 500 hPa Niveau. Für jedes der o. g. Flusseinzugsgebiete wurden 6 CPs identifiziert. Die feuchtesten, d. h. mit den höchsten mittleren Gebietsniederschlägen verbundenen, CPs sind beispielhaft für das Einzugsgebiet des Rheins in Abbildung 1 dargestellt. Die Zentren der negativen Druckanomalien befinden sich im Bereich der Nordsee zwischen den britischen Inseln und Skandinavien bzw. direkt über dem südlichen Bereich von Skandinavien. Für Elbe und Donau sehen die Muster ähnlich aus, jedoch sind hier die Tiefdruckgebiete etwas weiter nach Norden verschoben. Neben diesen räumlichen Mustern wurden auch die mit den jeweiligen CPs verbundenen Niederschlagsverteilungen untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Unterschiede in den Niederschlägen, die den jeweiligen CPs zugeordnet wurden, in großen Einzugsgebieten eher unspezifisch sind. Dies ist vermutlich auf die Größe der Einzugsgebiete und die damit verbundene Mittelung des Niederschlags zurückzuführen. Da die CPs spezifisch für jedes betrachtete Einzugsgebiet bestimmt werden, hat sich gezeigt, dass deutlichere Unterschiede in den mit den CPs assoziierten Niederschlägen und deren Verteilungsfunktionen in kleinen und mittleren Flusseinzugsgebieten erzielt wurden. Daher wurde diese Methode auch für das Neckareinzugsgebiet angewandt. Die beiden feuchtesten CPs für dieses Gebiet sind in Abbildung 2 dargestellt. Die bedingten Verteilungsfunktionen des Gebietsniederschlags im Neckareinzugsgebiet werden in Abbildung 3 dargestellt. Hier ist eine deutliche Differenzierung zwischen der Wahrscheinlichkeit eines nassen Tages und dem maximal möglichen Niederschlag zu sehen. Dies deutet darauf hin, dass die hier entwickelte Methodik zur Wetterlagenklassifikation in kleineren und mittleren Einzugsgebieten zu besseren Ergebnissen führt als in großen Flusseinzugsgebieten wie denen von Rhein, Elbe oder Donau.

Grundsätzlich ist zu bedenken, dass eine "nasse" Wetterlage alleine keine Erklärung für das Auftreten von extremen Hochwasserereignissen ist, da die damit verbundenen Niederschläge an einem Tag in großen Flusseinzugsgebieten nur selten Hochwasser verursachen. Die Niederschlagsmenge kann für dieselbe

2 <https://www.bafg.de/GRDC>

3 <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/index.xhtml>

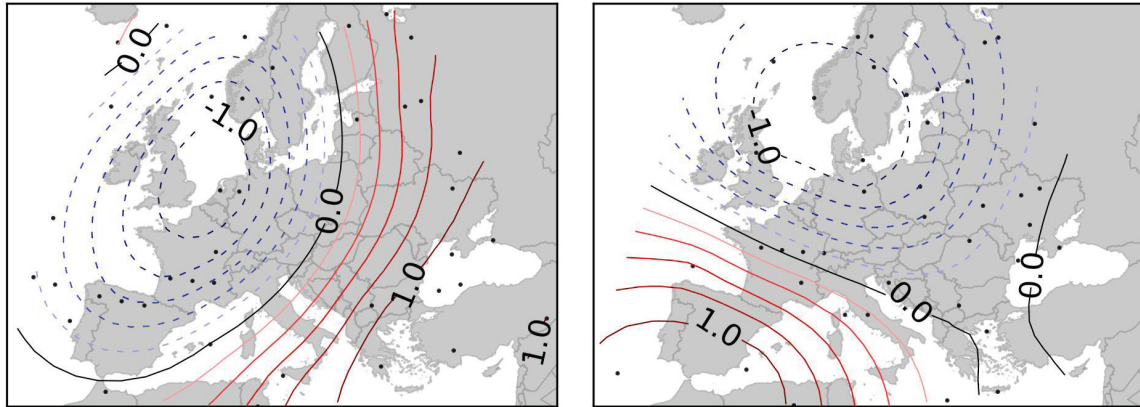


Abbildung 1

Feuchteste CPs für das Rhein-Einzugsgebiet dargestellt als normierte Abweichung vom mittleren Luftdruck zwischen -1 und +1.
 Wettest CPs for the Rhine catchment shown as anomaly of the mean air pressure between -1 and +1.

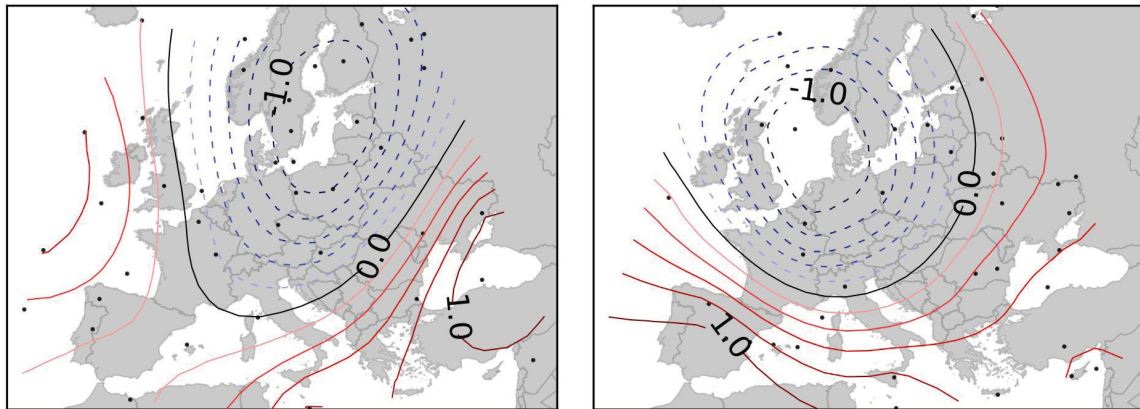


Abbildung 2

Feuchteste CPs für das Neckar-Einzugsgebiet dargestellt als normierte Abweichung vom mittleren Luftdruck zwischen -1 und +1.
 Wettest CPs for the Neckar catchment shown as anomaly of the mean air pressure between -1 and +1.

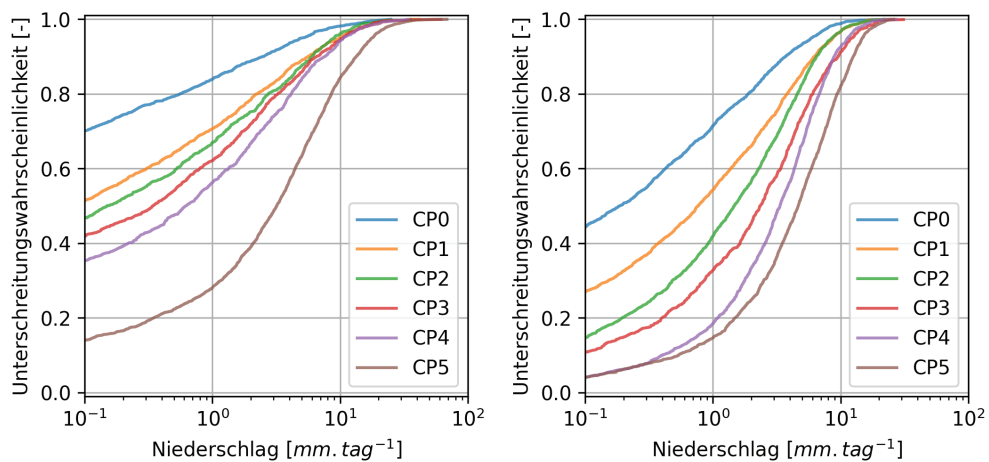


Abbildung 3

CP-bedingte Niederschlagsverteilungen für das Neckar-Einzugsgebiet (links) und das Rhein-Einzugsgebiet (rechts). CP0 ist die jeweils trockenste und CP5 die feuchteste für das entsprechende Einzugsgebiet.
 CP conditioned precipitation distributions for the Neckar catchment (left) and the Rhine catchment (right). CP0 is the driest while CP5 is the wettest for the corresponding catchment.

CP durch andere Einflüsse stark variieren. Zudem werden andere Faktoren wie zum Beispiel die Bodenfeuchte oder Schneebedeckung bei dieser Analyse nicht betrachtet. Wenn an mehreren Tagen in Folge nasse CPs auftreten, bedeutet dies jedoch eine höhere Wahrscheinlichkeit für hohe bzw. extreme Niederschläge, die zu Hochwasserereignissen führen können. Die Information aus der Abfolge der täglichen CPs im Beobachtungszeitraum wurde für eine umfassendere Niederschlagssimulation verwendet. Hierfür wurde ein CP-Generator basierend auf einer Markov-Kette und einer Matrix aus Übergangswahrscheinlichkeiten der einzelnen CPs erstellt, mit welchem neue CP-Zeitreihen mit beliebiger Länge erzeugt werden können (s. Kap. 5).

4 Untersuchung der räumlichen Abhängigkeit von Extremen

Um die Abhängigkeitsstruktur von Abflusszeitreihen zu ermitteln, wurden diese Daten Fourier-transformiert und ihre spektralen Eigenschaften untersucht. Hierfür wurden zwei verschiedene Arten von Zusammenhängen für Paare von Abflusszeitreihen betrachtet. Zum einen waren dies Zeitreihen, die zeitgleich hohe Werte aufweisen, was sich in einer hohen Dichte im oberen Wertebereich der empirischen Copula widerspiegelt, in der die Daten der Größe nach sortiert aufgetragen sind, was dann einem gleichzeitigen Auftreten von hohen Abflüssen entspricht. Zum anderen wurden Zeitreihen analysiert, die dieses Verhalten nicht aufweisen, aber in der paarweisen Kreuzkorrelation sehr ähnlich zu den erstgenannten Zeitreihen sind.

Das Ziel dieser Untersuchung war es, Unterschiede im spektralen Bereich in Bezug auf die Abhängigkeit einer Variablen wie Niederschlag oder Abfluss an verschiedenen Punkten im Raum zu finden. Für jede Zeitreihe wurde das Magnituden- und Phasenspektrum berechnet und daraus die Kreuzkorrelation unter Berücksichtigung der Phasendifferenzen ermittelt. Das Ergebnis ist ein Spektrum, aus dem der Beitrag der Koeffizienten von verschiedenen Frequenzen zur gesamten Kreuzkorrelation ersichtlich ist. Durch den Vergleich dieser Spektren für die beiden betrachteten Zeitreihentypen wurde festgestellt, dass Zeitreihen mit einem größeren Korrelationsbeitrag in den hohen Frequenzen diejenigen sind, die eher ein synchrones Auftreten von Extremwerten aufweisen. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel, bei dem zwei Paare von täglichen Abflusszeitreihen in Österreich so ausgewählt wurden, dass ihre Kreuzkorrelationen sehr ähnlich sind (innerhalb von $\pm 0,01$), aber signifikante Unterschiede in den Beiträgen der verschiedenen Frequenzen zur Gesamtkorrelation aufwiesen. Das Beispiel des blauen Zeitreihenpaares (Abb. 4, links) zeigt ein synchroneres Verhalten bei der Saisonalität im Jahresgang bei 365 Tagen, welches einen großen Anteil zur Korrelation beiträgt. Ein weiterer sprunghafter Anstieg ist bei 180 Tagen zu erkennen. Die kürzeren Frequenzen haben hier insgesamt nur einen geringen Beitrag. Bei dem orangenen Zeitreihenpaar (Abb. 6, rechts) ist dieses Verhalten genau umgekehrt, d. h. das größere synchrone Verhalten ist hier bei den kürzeren Frequenzen zu beobachten. Die entsprechenden empirischen Copulas dieser Zeitreihenpaare (Abb. 4, Mitte und unten) zeigen, dass ein gleichzeitiges Auftreten von extremen Abflüssen bei dem orangenen Zeitreihenpaar deutlich wahrscheinlicher ist als bei dem blauen Zeitreihenpaar.

Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen können verwendet werden, um Standorte zu identifizieren, bei denen die Wahr-

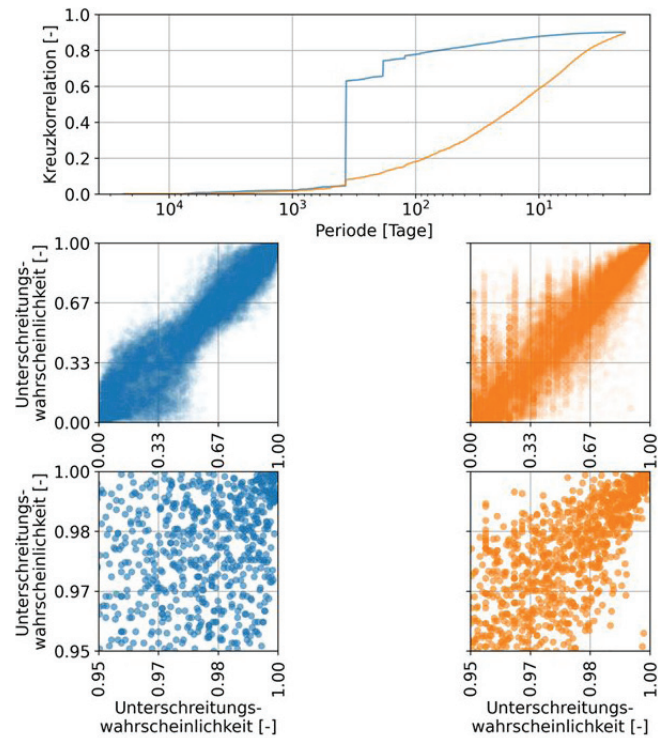


Abbildung 4 Beispielhafter Vergleich der Kreuzkorrelationsspektren von zwei täglichen Abflusszeitreihenpaaren in Österreich, wobei eines einen geringen Beitrag bei hohen Frequenzen (blau) und das andere einen höheren Beitrag (orange) aufweist. Die mittlere Reihe zeigt die empirische Copula der beiden Abflusszeitreihenpaare, während die letzte Reihe nur die oberen 95 % der entsprechenden Copula zeigt.
Exemplary comparison of cross-correlation spectra of two pairs of daily discharge time series in Austria, where one pair shows low correlation in the higher frequencies (blue) and one pair shows high correlation in the higher frequencies. The middle row shows the empirical copulas of both pairs of time series, while the last row shows the upper corner of the corresponding copula with non-exceedance probabilities of 95 %.

scheinlichkeit für ein gleichzeitiges Auftreten von Extremwerten größer ist, was mit herkömmlichen univariaten Statistiken nicht möglich ist. So können beispielsweise Einzugsgebiete danach gruppiert werden, ob die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten von hohen Abflüssen hoch oder gering ist. Des Weiteren können auf Basis dieser Ergebnisse bivariate Zeitreihen simuliert werden, bei denen beispielsweise explizit definiert wird, dass sie eine größere Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten großer Werte aufweisen.

Im Allgemeinen wird die Abhängigkeit zwischen Variablen auf einer bivariaten Basis beschrieben. Gängige Metriken hierfür sind die Pearson- oder Spearman-Korrelation oder der Kendallsche Rangkorrelationskoeffizient. Um mehr als paarweise Abhängigkeiten, d. h. die Anzahl von Eingangsvariablen, berücksichtigen zu können, müssen Abhängigkeiten höherer Ordnung untersucht werden.

Ein Maß, welches für die Analyse der Abhängigkeit höherer Ordnung verwendet werden kann, ist die binäre Indikatorfrequenz (BIF). Die binäre Indikatorfrequenz wird aus einer Anzahl von Zeitreihen (n) mit einer zeitlichen Auflösung (t) berechnet. Zuerst wird jede Zeitreihe individuell mittels eines Schwellenwertes

(bspw. dem 99 %-Perzentil) in eine binäre Indikatorzeitreihe transformiert, d. h. alle Werte über dem Schwellenwert werden auf 1 und alle unterhalb auf 0 gesetzt. Aus den n Indikatorzeitreihen können nun verschiedene Kombinationen in Hinblick auf ihr Verhalten untersucht werden. Beispielsweise können aus den Indikatorzeitreihen für bestimmte Gruppen die relativen Häufigkeiten ermittelt werden, dass bestimmte Kombinationen an Überschreitungen von Schwellenwerten auftreten. In Abbildung 5 wird die BIF für stündliche Abflüsse an den Pegeln Kirchentellinsfurt (Neckar), Plochingen (Fils), Vaihingen (Enz), Stein (Kocher) und Untergriesheim (Jagst) im Neckar-Einzugsgebiet dargestellt. Die Fälle, in denen der Abfluss an nur einem Pegel über dem 99 %-Perzentil liegt, sind generell am häufigsten. Die Fälle, in denen das zeitgleich an 2, 3 oder 4 Pegeln vorkommt, sind weniger häufig. Interessanterweise steigt die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens von Hochwasser bei der Betrachtung von 5 Pegeln wieder an. Eine Erklärung hierfür könnten die unterschiedlichen saisonalen Niederschlagsprozesse sein. Im Sommer sind kleinräumige konvektive Niederschläge für Hochwasser verantwortlich, die meist nur in einem einzelnen Einzugsgebiet auftreten. Im Winter werden Hochwasser hingegen überwiegend durch langanhaltende und flächenhafte Niederschläge verursacht, die dann alle Einzugsgebiete gleichzeitig betreffen.

Prinzipiell können auch Kombinationen von mehr als 5 Zeitreihen untersucht werden. Das Problem bei solchen Kombinationen ist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass alle Werte gleichzeitig 1 sind, sehr schnell abnimmt, was zu einem geringeren Stichprobenumfang und damit zu einer größeren Unsicherheit führt. Mehrere Einzugsgebiete können auf Ähnlichkeit geprüft werden, indem diese Grenzwerte für sie verglichen werden. Auf diese Weise können Einzugsgebiete, die dieselbe Art von Abhängigkeit höherer Ordnung aufweisen, in Gruppen zusammengefasst werden. Hierbei ist zu erwarten, dass nahe beieinander liegende Regionen ein ähnliches Verhalten aufweisen.

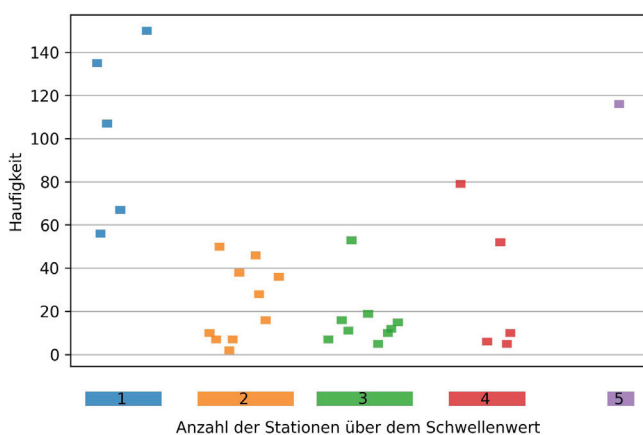


Abbildung 5

Binäre Indikatorfrequenzen (BIF) für das 99 %-Perzentil der stündlichen Abflüsse für die Pegel Kirchentellinsfurt (Neckar), Plochingen (Fils), Vaihingen (Enz), Stein (Kocher) und Untergriesheim (Jagst) im Neckar-Einzugsgebiet. Die Breite der Balken auf der x-Achse spiegelt die unterschiedliche Anzahl an möglichen Kombinationen wider.

Binary Indicator Frequencies (BIF) for the 99 %-percentile for hourly discharge data at the gauges Kirchentellinsfurt (Neckar), Plochingen (Fils), Vaihingen (Enz), Stein (Kocher) and Untergriesheim (Jagst) in the Neckar river catchment. The width of the bars on the x-axis depicts the different possible combinations.

Mit einer solchen Analyse kann festgestellt werden, welche Art von Zeitreihengeneratoren für die in der SPATE-Forschungsgruppe relevanten Fragestellungen verwendet werden können. Darüber hinaus können vorhandene multivariate Datensätze auf die Art der Abhängigkeit, die ihre Extreme aufweisen, überprüft werden. Außerdem können die bedingten Häufigkeiten auch für die Fälle getestet werden, in denen bei gegebener Kombinationsgröße nur eine Teilmenge der Indikatoren 1 ist, im Gegensatz zu den Fällen, in denen alle 1 sind. Dies gibt Aufschluss über die asymmetrische Natur der Abhängigkeit höherer Ordnung in einer gegebenen Anzahl von Zeitreihen.

5 Einfluss der Messnetzdichte von Niederschlagsstationen auf Extreme

Niederschläge sind räumlich und zeitlich sehr variabel. Diese Variabilität wird von herkömmlichen Niederschlagsmessnetzen nicht erfasst, was dazu führt, dass Niederschlagsextreme unterschätzt werden. Eine Studie von LENGFELD et al. (2020) basierend auf Radardaten hat gezeigt, dass etwa 80 % der stündlichen Niederschlagsextreme nicht von Bodenmessnetzen erfasst wurden. Diese Unterschätzung hat auch Auswirkungen auf die hydrologische Modellierung, vor allem für Extremereignisse. Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde die Auswirkung der Messstellendichte auf den Einzugsgebietsniederschlag und den daraus resultierenden Abfluss bei der hydrologischen Modellierung untersucht. Als Referenz wurden für eine Domäne im Neckar-Einzugsgebiet tägliche Gebietsniederschläge basierend auf 343 Niederschlagsstationen interpoliert und daraus der Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet der Enz bestimmt. Anschließend wurden die Niederschlagsstationen zufällig auf 10, 25, 50, 100 und 150 ausgedünnt und darauf basierend wieder der Gebietsniederschlag wie oben berechnet. Diese Ausdünnung wurde für jede Anzahl an Stationen 100-mal wiederholt. Bei dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass eine geringere Dichte an Niederschlagsmessungen häufig zu einer systematischen Unterschätzung der größten Gebietsniederschläge führt. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse für die fünf größten beobachteten Gebietsniederschläge dargestellt. Die mittlere Abweichung der Gebietsniederschläge im Vergleich zur Referenz ist durch den blauen Querbalken dargestellt, die Violinen-Plots zeigen die Abweichungen für die jeweils 100 Realisationen. Es ist zu erkennen, dass bei einer geringen Stationsdichte die Gebietsniederschläge im Mittel deutlich unterschätzt werden, auch wenn einzelne Realisationen sogar zu einer Überschätzung führen können. Mit zunehmender Stichprobengröße nehmen die systematische Unterschätzung und die Streuung ab. Die Gebietsniederschläge wurden dann als Eingangsdaten für eine hydrologische Modellierung im Einzugsgebiet der Enz verwendet, was im Mittel zu einer noch stärkeren Unterschätzung der Spitzenabflüsse führt (Abb. 7). Dieser Sachverhalt ist unabhängig von dem verwendeten hydrologischen Modell und ein Beispiel für die Unsicherheit, die durch fehlerhafte Eingangsdaten bei der hydrologischen Modellierung auftreten kann. Während die Abweichungen bei zunehmender Stationsanzahl bei Betrachtung des Niederschlags geringer werden, ist dies beim Abfluss nicht der Fall, was sich auf die räumliche Struktur der interpolierten Niederschlagsfelder zurückführen lässt, die für jede Realisation sehr unterschiedlich sein kann. Für eine ausführliche Beschreibung der Methode und der Ergebnisse wird auf die Studie von BÄRDOSSY & ANWAR (2023) verwiesen.

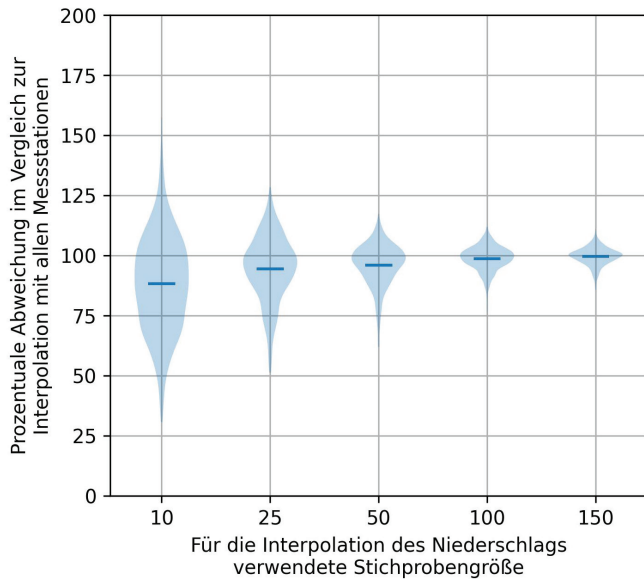


Abbildung 6
 Über-/Unterschätzung der fünf größten Gebietsniederschläge in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Niederschlagsstationen gegenüber allen verfügbaren Niederschlagsstationen im Bereich des Einzugsgebiets der Enz.
Under-/overestimation of the mean of the five largest catchment precipitation values by using different gauging densities compared to using all 343 gauges in and around the Enz catchment.

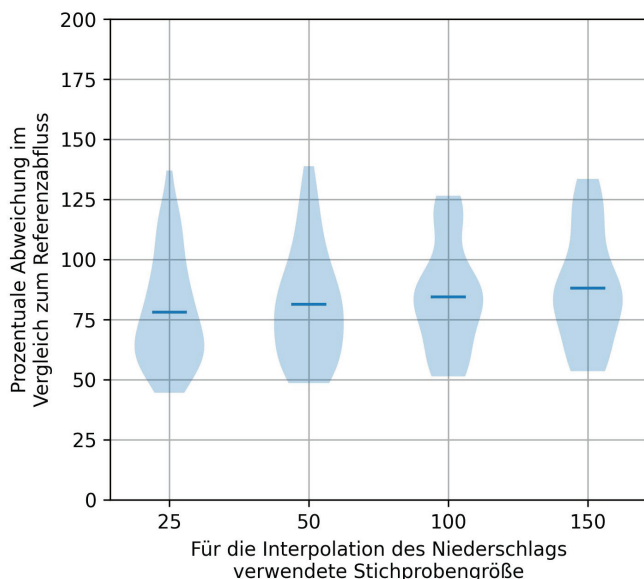


Abbildung 7
 Über-/Unterschätzung der fünf größten Spitzenabflüsse in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Niederschlagsstationen gegenüber allen verfügbaren Niederschlagsstationen im Bereich des Einzugsgebiets der Enz.
Under-/overestimation of the mean of the five largest discharge values by using different gauging densities compared to all available precipitation stations for the Enz catchment.

6 Modell zur Generierung von simultanen Niederschlagszeitreihen

Für die Generierung von raum-zeitlichen Niederschlagszeitreihen wurde der Ansatz eines auf einem Fast-Fourier Transform Moving Average (FFTMA) basierenden Prozesses (RAVALEC et al., 2000) aufgegriffen, der die spektrale Version des gleitenden Mittelwerts (Moving Average (MA); BOX et al., 2015)) darstellt. Der MA-Prozess erzeugt für einen Punkt eine neue Zeitreihe auf der Grundlage von zwei Eingaben, von denen eine die Autokorrelationsfunktion und die andere ein zufälliges normalverteiltes Rauschen ist. Die Autokorrelationsfunktion kann entweder empirisch direkt aus den Zeitreihen extrahiert oder theoretisch an Daten angepasst werden. Die Verteilung des Gaußschen Rauschens kann ebenfalls aus den Daten extrahiert werden. Um Zeitreihen für mehrere Punkte so zu erzeugen, dass auch ihre Kreuzkorrelationen reproduziert werden, wurde Simulated Annealing (SA) eingesetzt.

Der gesamte Algorithmus lässt sich wie folgt zusammenfassen. Da Niederschlagsdaten aufgrund der vielen 0 mm-Werte eine extreme Schiefe aufweisen, wurde für jeden Standort eine gemischte Verteilung an diese Daten angepasst. Aus den Zeitschritten mit 0 mm-Werten wurde die Unterschreitungswahrscheinlichkeit berechnet und an die Zeitschritte mit Niederschlägen (> 0 mm) wurde eine Gamma-Verteilung angepasst. Diese neuen Werte wurden in Standard-Normalwerte transformiert. Anschließend wurde eine Exponentialkorrelationsfunktion an jede Zeitreihe im Gaußschen Bereich angepasst. Diese wurde ebenfalls in Verteilungen für eine bestimmte Stunde eines Jahres gruppiert. Aus einer Kombination von Rauschen und der Autokorrelationsfunktion wurden mittels FFTMA neue Zeitreihen erzeugt. Schließlich wurde eine Rücktransformation durchgeführt, um Zeitreihen zu erhalten, die ähnliche Verteilungen wie die beobachteten aufweisen. Dieser Prozess wurde mit neu erzeugtem Rauschen unter Verwendung von SA wiederholt, bis simultane Zeitreihen entstanden, die die Zielfunktion optimieren. Darüber hinaus wurde aus den Übergangswahrscheinlichkeiten der CPs eine Zeitreihe mit Abfolgen von CPs generiert (s. Kap. 3). Diese Zeitreihen wurden verwendet, um bedingtes Rauschen zu generieren, was zu besseren Ergebnissen bei der Generierung von simultanen Zeitreihen führte.

7 Modell zur Generierung von simultanen Abflusszeitreihen

Abflusszeitreihen weisen im Vergleich zu Variablen wie Niederschlag und Temperatur ein besonderes Verhalten auf. Sie zeichnen sich durch eine exponentielle Verteilung mit vielen niedrigen Werten und wenigen großen Werten aus. Ein weiterer Unterschied sind die unterschiedlichen ansteigenden und abfallenden Äste von Hochwasserwellen, welche von der Einzugsgebietscharakteristik abhängen. Ein solches Verhalten ist richtungsabhängig, d. h. es kann nicht umgekehrt werden. Was das Verhalten des Abflusses bei der Betrachtung von zwei Pegeln angeht, so ist es im Allgemeinen so, dass die Stärke der Abhängigkeit der niedrigen Werte sehr unterschiedlich im Vergleich zu den hohen Werten ist. In einem trockenen Jahr sind beispielsweise alle Teileinzugsgebiete eines Einzugsgebiets zur gleichen Zeit und über sehr lange Zeiträume hinweg von niedrigen Abflüssen betroffen. Im Gegensatz dazu ist die Wahrscheinlichkeit, dass alle Teileinzugsgebiete zur gleichen Zeit und über

sehr lange Zeiträume hinweg hohe Abflüsse aufweisen, sehr viel geringer. Das Ziel bei der Generierung von simultanen Abflusszeitreihen ist es daher, diese Abhängigkeiten so zu berücksichtigen, dass die simulierten Abflusszeitreihen den beobachteten möglichst gut entsprechen. Um die statistischen Eigenschaften der hohen Abflüsse an mehreren Orten für die Simulation zu berücksichtigen, wurde auf das Konzept der *Phase Annealing* (PA) zurückgegriffen. PA ist eine von HÖRNING & BÁRDOSSY (2018) entwickelte Methode zur Simulation bedingter Realisierungen beliebiger Variablen in einer beliebigen Anzahl von Dimensionen. Das Konzept *Phase Annealing* (PA) ist in der Lage, Zeitreihen bzw. räumliche Felder zu erzeugen, die räumlich-zeitliche Bedingungen wie die Korrelationsfunktion und Integrale über Raum und Zeit einhalten. Asymmetrisches Verhalten, wie z. B. der Unterschied in der Stärke des Zusammenhangs von niedrigen und hohen Werten, kann ebenfalls erzwungen werden. Das Herzstück des Algorithmus ist die Fourier-Transformation, die die Umwandlung von Daten vom Zeit- in den Frequenzbereich und umgekehrt ermöglicht.

Interessanterweise führt die Veränderung der Daten im Spektralbereich zum Erhalt der Autokovarianzfunktion bei der Simulation verschiedener Werte. Diese Eigenschaft macht sich der PA-Algorithmus zunutze, um effizient Zeitreihen zu erzeugen, die diese Funktion stets beibehalten. Das Konzept der *Phase Annealing* ist eine Erweiterung der *Phase Randomization* (PR) (THEILER et al., 1992), bei der neue Zeitreihen, d. h. Surrogate, durch Randomisierung des Phasenspektrums in der Fourier-Transformation erzeugt werden. Dadurch entstehen neue Reihen, die untereinander die gleichen Auto- und Kreuzkorrelationen aufweisen, aber keinen Bezug zur ursprünglichen Reihe haben. Das Konzept der *Phase Randomization* (PR) hat verschiedene Nachteile, wie den Verlust der ursprünglichen Abhängigkeitsstruktur und die Umwandlung in eine multivariate Normalverteilung in Form einer Copula auf den Mittelwert. Die resultierenden Werte folgen ebenfalls einer Normalverteilung, deren Mittelwert und Varianz genau denen der ursprünglichen Reihe entsprechen. Ein Teil dieser Nachteile wird durch den Einsatz von PA vermieden, bei dem Änderungen am Phasenspektrum vorgenommen werden, aber nur solche akzeptiert werden, die zu einer Verbesserung der gewünschten Eigenschaften führen. Die ursprüngliche Verteilung der Variablen wird durch Anwendung der QQ-Transformation beibehalten, die die Werte von der Normalverteilung in die der Referenz umwandelt. Insbesondere wird die Autokorrelationsfunktion beibehalten, indem die quadrierte Differenz der Magnitudenspektren für die ursprüngliche und die simulierte Reihe minimiert wird, falls es aufgrund der QQ-Transformation zu Abweichungen kommt. Die Kreuzkorrelation hingegen wird beibehalten, indem die Differenz der Phasenspektren zwischen allen möglichen Paaren in der Zeitreihe erhalten bleibt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde das Konzept *Phase Annealing* für die Generierung von multivariaten täglichen Abflusszeitreihen in jeweils drei Teileinzugsgebieten von Donau, Elbe und Rhein verwendet. Das Hauptziel bestand darin, Zeitreihen zu erzeugen, bei denen die Verteilung der über die drei Pegel für jeden Zeitschritt summierten Abflüsse (im Folgenden als Abflusssummenverteilungen bezeichnet) derjenigen der beobachteten Abflussdaten nahekommt. Zu einer wesentlichen Verbesserung der Simulationen führte das Hinzufügen von zusätzlichen Bedingungen, die die Spearman-Korrelation (S) und die Kreuzordnungsasymmetrie (AO) berücksichtigen. Die

Kreuzordnungsasymmetrie *AO* ist eine Copula-basierte Metrik (GUTHKE, 2013), welche den relativen Unterschied in der Stärke des Zusammenhangs von hohen und niedrigen Werten einer bivariaten Zeitreihe beschreibt. Sie kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Ein *AO*-Wert von +1 würde bedeuten, dass die hohen Werte einer bivariaten Zeitreihe zusammenfallen, während die niedrigen Werte keine Abhängigkeit aufweisen. Bei einem Wert von -1 wäre dies genau umgekehrt. Für die Simulation von Abflusszeitreihen wurden zusätzliche Bedingungen zur Erhaltung von S und AO angewendet. Die Kreuzordnungsasymmetrie *AO* wurde für Paare von Zeitreihen berechnet. Diese sind für die allgemeine zeitliche Verschiebung der Durchflusswerte an mehreren Orten verantwortlich. Außerdem wurde festgestellt, dass die Kreuzkorrelation im höheren Frequenzbereich des Fourier-Phasenspektrums hauptsächlich für das Auftreten von gleichzeitigen Extremen verantwortlich ist. Daher kann es Fälle geben, in denen die Kreuzkorrelationswerte niedrig sind, aber der obere Rand der Abflusssummenverteilungen mit denen der beobachteten übereinstimmt.

In Abbildung 8 werden die Abflusssummenverteilungen der täglichen Abflüsse für drei große Teileinzugsgebiete der Donau (Donau bis Ingolstadt, Inn und Isar), der Elbe (Saale, Havel), des Rheins (Oberrhein bis Maxau, Mosel und Neckar) und der Weser (für die Weser bis Hannoversch-Münden, Aller und Leine) wiedergegeben. Diese Abflusssummen sind im Raum summiert, d. h. die Abflüsse für jeden Zeitschritt wurden aufaddiert. Hohe Werte bei den Abflusssummenkurven entsprechen somit Zeitschritten, an denen gleichzeitig Hochwasser aufgetreten sind. Die Abfluss-

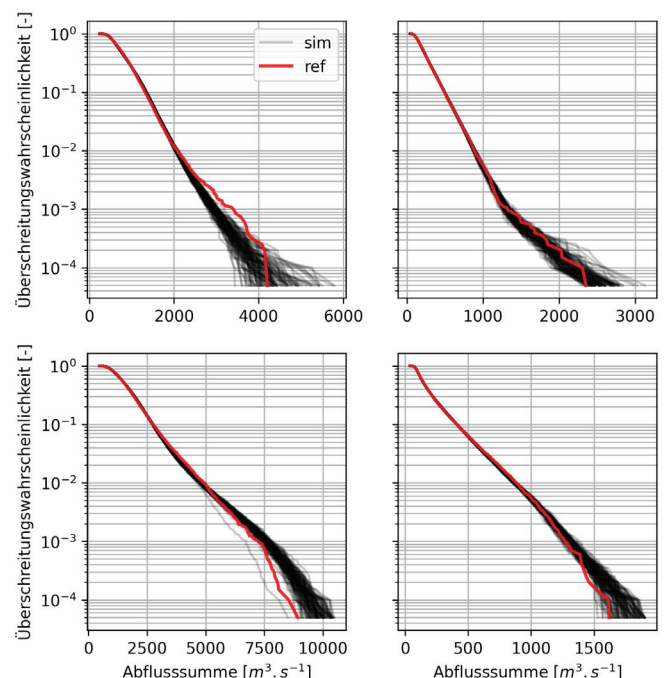


Abbildung 8

Abflusssummenverteilungen von Tagesmittelwerten im Zeitraum 1961 bis 2015 (rot Beobachtungen, schwarz Simulationen) für die Teileinzugsgebiete von Donau (oben links), Elbe (oben rechts), Rhein (unten links) und Weser (unten rechts).

Discharge-sum distributions for daily mean discharge (1961 to 2015) for three sub-catchments in the Danube (top-left), Elbe (top-right), Rhine (bottom-left) and Weser (bottom-right). Reference in red, simulations in black.

summenkurven wurden mittels der oben genannten Methode simuliert und mit den beobachteten Abflüssen verglichen. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Beobachtungen und die Simulationen weitestgehend gut übereinstimmen, es aber zu einer leichten Überschätzung bei den hohen Abflusswerten kommt. Die größte Abweichung ist für den Rhein zu erkennen, wo die Überschätzung etwa 6 % beträgt. Ein Problem, das bei der Simulation dieser Zeitreihen beobachtet wurde, war die Nicht-Stationarität in der Zeit. Fast alle Zeitreihen wiesen in ihrem Spektrum einen sehr hohen Anteil an Wellen auf, die mit Frequenzen von mehr als einem Jahr schwankten (hier nicht dargestellt). Es ist unmöglich, ein solches Verhalten explizit in einen Zeitreihengenerator einzubauen, da nicht bekannt ist, wie sich dieses langfristige Verhalten über die Zeit entwickelt. Ein weiterer Aspekt, der bei der Simulation des Abflusses berücksichtigt werden muss, ist dass es sich hierbei um eine weitgehend deterministische Reaktion des Einzugsgebiets auf ein Niederschlagsereignis handelt. All diese Eigenschaften machen es schwierig, simultane Abflusszeitreihen mit einem statistischen Zeitreihengenerator zu generieren.

8 Schlussfolgerungen

Mit den vorliegenden Untersuchungen wurde die Abhängigkeit von simultanem Auftreten von Hochwasserextremen in der SPATE-Forschungsgruppe untersucht. Bestehende Methoden wie die Klassifizierung von atmosphärischen Zirkulationsmustern (CP) und Phase Annealing (PA) wurden genutzt, um das untersuchte Phänomen besser zu verstehen bzw. zu erklären. Neben der Untersuchung von gleichzeitigen Extremen wurde die Simulation eines solchen Verhaltens durch stochastische Zeitreihengeneratoren implementiert und getestet. Es wurden Methoden entwickelt, die die Abhängigkeit im Raum erklären, wie der binäre Frequenzindikator (BIF) und das Verhalten von hohen Frequenzen im Fourier-Spektrum von Abflusszeitreihen. Zu den Ergebnissen des Teilprojekts gehören auch Konzepte bzw. Werkzeuge zur Generierung von Niederschlags- und Abflusszeitreihen, die die beobachteten multivariaten statistischen Eigenschaften berücksichtigen und sich somit für die Simulation und Analyse von Werten in den oberen Rändern von Verteilungen wie den Abflusssummenverteilungen eignen.

Die wichtigsten Ergebnisse aus diesem Teilprojekt der SPATE-Forschungsgruppe lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Bestimmte großräumige meteorologische Phänomene wie atmosphärische Zirkulationsmuster können mit hohen Niederschlägen verbunden sein. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese Methode in mesoskaligen Einzugsgebieten zu einer besseren Differenzierung von trockenen und feuchten Wetterlagen führt als in großen Einzugsgebieten. Der Zusammenhang erklärt aber nur teilweise das Auftreten von Hochwasserextremen, da auch bei trockenen Wetterlagen hohe Niederschlagssummen auftreten können. Nichtsdestotrotz können solche Informationen bei der Simulation verwendet werden, um simultane Niederschlags- bzw. Abflusszeitreihen zu erzeugen, die die raum-zeitlichen Charakteristiken von Beobachtungsdaten widerspiegeln.
- Die Stationsdichte von Niederschlagsmessungen hat einen maßgeblichen Einfluss darauf, ob hohe Niederschlagswerte von Stationen erfasst werden. Wenn die Stationsdichte von

Niederschlagsdaten nicht ausreichend hoch ist, dann kommt es bei der Interpolation von Gebietsniederschlägen häufiger zu Unter- als zu Überschätzungen von Niederschlagsmaxima und somit auch zu entsprechenden Unterschätzungen von extremen Spitzenabflüssen bei der hydrologischen Modellierung.

- Die Abhängigkeitsstruktur von hohen und niedrigen Werten in Raum und Zeit kann sehr unterschiedlich sein. Die lässt sich direkt an Phasenunterschieden im Fourier-Spektrum von zwei beliebigen Abfluss- oder Niederschlagszeitreihen ablesen. Diese Information sollte für die Verwendung in Zeitreihengeneratoren und als Bewertungsinstrument für bestehende Algorithmen genutzt werden.

Conclusions

The presented research was conducted to investigate the dependence of simultaneous occurrence of flood extremes in this SPATE research group. Existing methods such as the atmospheric circulation pattern (CP) classification and Phase Annealing (PA) were used to better understand and explain the phenomenon under study. In addition to the study of simultaneous extremes, the simulation of such behaviour by stochastic time series generators was implemented and tested. Methods were developed to explain the dependence structures in space and time, such as the binary frequency indicator (BIF) and the behaviour of high frequencies in the Fourier spectrum of runoff time series. Results of this sub-project also include concepts and tools for the generation of precipitation and runoff time series that are more suitable for simulation and analysis of values in the upper tails of distribution as shown in the discharge-sum distributions.

The main results from this subproject of the SPATE research group can be summarized as follows.

- Certain large-scale meteorological phenomena such as weather patterns may be associated with high precipitation. The results indicate that this method leads to a better differentiation of dry and wet circulation patterns in mesoscale catchments than in large catchments. However, the association only partially explains the occurrence of large floods since high precipitation events can also occur during dry circulation patterns. Nevertheless, such information can be used in simulation to generate time series that approximate the observed data in their spatiotemporal characteristics.
- The station density of precipitation measurements has a significant influence on whether high values are recorded by these stations. If the density of a rain gauge network is not sufficiently high, then the interpolation of area precipitation can often lead to a systematic underestimation of precipitation maxima and thus also to an underestimation of extreme peak discharges in hydrological modelling.
- The dependence structure of high and low values in space and time can be very different. This can be inferred directly from phase differences of the frequencies in the Fourier spectrum of two discharge or precipitation time series. This information should be used for time series generators and also as an evaluation tool for existing algorithms.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die während der aktuellen Studie erzeugten und/oder analysierten Datensätze können auf ordnungsgemäße Anfrage von den Verfassern erhalten werden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschungsgruppe FOR 2416 (Space-Time Dynamics of Extreme Floods, SPATE)

Anschrift der Verfasser

András Bárdossy
 Jochen Seidel
 Faizan Anwar
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
 Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 61
 70569 Stuttgart
 andras.bardossy@iws.uni-stuttgart.de
 jochen.seidel@iws.uni-stuttgart.de
 faizan.anwar@iws.uni-stuttgart.de

Literaturverzeichnis

- BÁRDOSSY, A. (2010): Atmospheric Circulation Pattern Classification for South-West Germany Using Hydrological Variables. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 35 (9-12): 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.02.007>.
- BÁRDOSSY, A. & F. ANWAR (2023): Why our rainfall-runoff models keep underestimating the peak flows?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 1987–2000. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1987-2023>.
- BÁRDOSSY, A., L. DUCKSTEIN & I. BOGARDI (1995): Fuzzy Rule-Based Classification of Atmospheric Circulation Patterns. *International Journal of Climatology* 15 (10): 1087–97. <https://doi.org/10.1002/joc.3370151003>.
- BÁRDOSSY, A. & S. HÖRNING (2016): Gaussian and Non-Gaussian Inverse Modeling of Groundwater Flow Using Copulas and Random Mixing. *Water Resources Research* 52 (6): 4504–26. <https://doi.org/10.1002/2014WR016820>.
- BÁRDOSSY, A., J. STEHLÍK & H.-J. CASPARY (2002): Automated Objective Classification of Daily Circulation Patterns for Precipitation and Temperature Downscaling Based on Optimized Fuzzy Rules. *Climate Research* 23 (1): 11–22. <https://doi.org/10.3354/cr023011>.
- BOX, G., G. JENKINS, G. REINSEL & G. LJUNG (1976): *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 712 S., 5. Auflage, John Wiley & Sons Inc.
- ČERNÝ, V. (1985): Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45 (1): 41–51. <https://doi.org/10.1007/bf00940812>.
- GUTHKE, P. (2013): Non-multi-Gaussian spatial structures: process-driven natural genesis, manifestation, modeling approaches, and influences on dependent processes. *Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart: Heft 220*. 145 S.
- MOSTAFA H., C. CZAKAY, C. PRIMO, A. HOFF & B. AHRENS (2023): Zu atmosphärischen Ursachen für extreme Hochwasserereignisse in Mitteleuropa. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung XX(X)*, S. xx-xx.
- HEUVELINK, G. & D. GRIFFITH (2010): Space-Time Geostatistics for Geography: A Case Study of Radiation Monitoring Across Parts of Germany. *Geographical Analysis* 42 (2): 161–79. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2010.00788.x>.
- HÖRNING, S & A. BÁRDOSSY (2018): Phase Annealing for the Conditional Simulation of Spatial Random Fields. *Computers and Geosciences* 112: 101–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.12.008>.
- HOUSSOS, E., C. LOLIS & A. BARTZOKAS (2008): Atmospheric Circulation Patterns Associated with Extreme Precipitation Amounts in Greece. *Advances in Geosciences* 17: 5–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-17-5-2008>.
- HOY, A, MAIT S, MATSCHULLAT, J. (2013): Large-Scale Atmospheric Circulation Forms and Their Impact on Air Temperature in Europe and Northern Asia. *Theoretical and Applied Climatology* 113 (3): 643–58. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0813-9>.
- HUTH, R., C. BECK, A. PHILIPP, M. DEMUZERE, Z. USTRNUL, M. CAHYNOVÁ, M. KYSELÝ & O.-E. TVEITO (2008): Classifications of Atmospheric Circulation Patterns: Recent Advances and Applications. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1146 (1): 105–52. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.019>.
- IBEBUCHI, C. (2021): Circulation Pattern Control of Wet Days and Dry Days in Free State, South Africa. *Meteorology and Atmospheric Physics* 133: 1469-1880. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00822-0>.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, S. IREDELL, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K. MO, C. ROPLUESKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNAOLDS, R. JENNE & D. JOSEPH (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437–72. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2).
- KIRKPATRICK, S., C. GELATT & M. VECCHI (1983): Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220 (4598): 671–80. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
- LENGFELD, K., P.-E. KIRSTETTER, H. FOWLER, J. YU, A. BECKER, Z. FLAMIG & J. GOURLEY (2020): Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations. *Environmental Research Letters* 15 (8): 085003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>.
- PRINGLE, J., D. STRETCH & A. BÁRDOSSY (2014): Automated Classification of the Atmospheric Circulation Patterns That Drive Regional Wave Climates. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14 (8): 2145–55. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2145-2014>.
- RAVALEC, M., B. NOETINGER & Y. HU (2000): The FFT moving average (FFT-MA) generator: An efficient numerical method for generating and conditioning gaussian simulations, *Mathematical Geology*, 32(6), 701–723.
- ROMERO, R., G. SUMNER, C. RAMIS & A. GENOVÉS (1999): A Classification of the Atmospheric Circulation Patterns Producing Significant Daily Rainfall in the Spanish Mediterranean Area. *International Journal of Climatology* 19 (7): 765–85. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19990615\)19:7<765::AID-JOC388>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19990615)19:7<765::AID-JOC388>3.0.CO;2-T).
- SCHLEF, K., H. MORADKHANI & U. LALL, U. (2019): Atmospheric Circulation Patterns Associated with Extreme United States Floods Identified via Machine Learning. *Scientific Reports* 9 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43496-w>.
- THEILER, J., S. EUBANK, A. LONGTIN, B. GALDRIKIAN & J. FARMER (1992): Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 58 (1), 77–94. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90102-S](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90102-S).
- WARD, J. (1963): Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association* 58 (301): 236–44. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>.