

Sergiy Vorogushyn, Heiko Apel, Matthias Kemter & Annegret H. Thieken

Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser

Analysis of flood hazard in the Ahr Valley considering historical floods

Die Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 in Westdeutschland erfordert eine kritische Diskussion über die Abschätzung der Hochwassergefährdung, Aktualisierung von Hochwassergefahrenkarten und Kommunikation von extremen Hochwasserszenarien. In der vorliegenden Arbeit wurde die Extremwertstatistik für die jährlichen maximalen Spitzenabflüsse am Pegel Altenahr im Ahrtal mit und ohne Berücksichtigung historischer Hochwasser berechnet und verglichen. Die Schätzung der Wiederkehrperiode für das aktuelle Hochwasser mittels Generalisierter Extremwertverteilung (GEV) unter Berücksichtigung historischer Hochwasser schwankt zwischen etwa 2.600 und über 58.700 Jahren (90%-Konfidenzintervall) mit einem Median bei etwa 8.600 Jahren, wogegen die Schätzung, die nur auf der systematisch gemessenen Abflusszeitreihe von 74 Jahren basiert, theoretisch eine Wiederkehrperiode von über 100 Millionen Jahren ergeben würde. Die Berücksichtigung der historischen Hochwasser führt zu einer dramatischen Änderung der Hochwasserquantile, die für eine Gefahrenkartierung zugrunde gelegt werden. Die Anpassung der GEV an die Zeitreihe mit historischen Hochwassern zeigt dennoch, dass das GEV-Modell möglicherweise die Grundgesamtheit der Hochwasser im Ahrtal nicht adäquat abbilden kann. Es könnte sich im vorliegenden Fall um eine gemischte Stichprobe handeln, in der die extremen Hochwasser im Vergleich zu kleineren Ereignissen durch besondere Prozesse hervorgerufen werden. Somit könnten die Wahrscheinlichkeiten von extremen Hochwassern deutlich größer sein, als aus dem GEV-Modell hervorgeht. Hier sollte in Zukunft die Anwendung einer prozessbasierten Mischverteilung untersucht werden.

Der Vergleich von amtlichen Gefahrenkarten zu Extremhochwassern (HQextrem) im Ahrtal mit den Überflutungsflächen vom Juli 2021 zeigt eine deutliche Diskrepanz in den betroffenen Gebieten und die Notwendigkeit, die Grundlagen zur Erstellung der Extremszenarien zu überdenken. Die hydrodynamisch-numerischen Simulationen von 1.000-jährlichen Hochwassern (HQ1000) unter Berücksichtigung historischer Ereignisse und des größten historischen Hochwassers 1804 können die Gefährdung des Juli-Hochwassers 2021 deutlich besser widerspiegeln, wenngleich auch diese beiden Szenarien die Überflutungsflächen unterschätzen. Besondere Effekte wie die Verklausung von Brücken und die geomorphologischen Änderungen im Flussschlauch führten zu noch größeren Überflutungsflächen im Juli 2021, als die Simulationsergebnisse zeigten. Basierend auf dieser Analyse wird eine einheitliche Festlegung von HQextrem bei Hochwassergefahrenkartierungen in Deutschland vorgeschlagen, die sich an höheren Hochwasserquantilen im Bereich von HQ1000 orientiert. Zusätzlich sollen simulationsbasierte Rekonstruktionen von den größten verlässlich dokumentierten historischen Hochwassern und/oder synthetische Worst-Case-Szenarien in den Hochwassergefahrenkarten gesondert dargestellt werden. Damit wird ein wichtiger Beitrag geleistet, um die potenziell betroffene Bevölkerung und das Katastrophenmanagement vor Überraschungen durch sehr seltene und extreme Hochwasser in Zukunft besser zu schützen.

Schlagwörter: Extremwertstatistik, historische Hochwasser, Gefahrenkarten, Überflutungssimulation, Ahr

The flood disaster in July 2021 in western Germany calls for a critical discussion on flood hazard assessment, revision of flood hazard maps and communication of extreme flood scenarios. In the presented work, extreme value analysis was carried out for annual maximum peak flow series at the Altenahr gauge on the river Ahr. We compared flood statistics with and without considering historical flood events. An estimate for the return period of the recent flood based on the Generalized Extreme Value (GEV) distribution considering historical floods ranges between about 2600 and above 58700 years (90% confidence interval) with a median of approximately 8600 years, whereas an estimate based on the 74-year long systematically recorded flow series would theoretically exceed 100 million years. Consideration of historical floods dramatically changes the flood quantiles that are used for the generation of official flood hazard maps. The fitting of the GEV to the time series with historical floods reveals, however, that the model potentially inadequately reflects the flood population. In this case, we might face a mixed sample, in which extreme floods result from very different processes compared to smaller floods. Hence, the probabilities of extreme floods could be much larger than those resulting from a single GEV model. The application of a process-based mixed flood distribution should be explored in future work.

The comparison of the official HQextrem flood maps for the Ahr Valley with the inundation areas from July 2021 shows a striking discrepancy in the affected areas and calls for revision of design values used to define extreme flood scenarios. The hydrodynamic simulations of a 1000-year return period flood considering historical events and of the 1804 flood scenario compare much better to the flooded areas from July 2021, though both scenarios still underestimated the flood extent.

Particular effects such as clogging of bridges and geomorphological changes of the river channel led to considerably larger flooded areas in July 2021 compared to the simulation results. Based on this analysis, we call for a consistent definition of HQextrem for flood hazard mapping in Germany, and suggest using high flood quantiles in the range of a 1,000-year flood. Flood maps should additionally include model-based reconstructions of the largest, reliably documented historical floods and/or synthetic worst-case scenarios. This would be an important step towards protecting potentially affected population and disaster management from surprises due to very rare and extreme flood events in future.

Keywords: Extreme value statistics, historical floods, flood hazard mapping, inundation simulation, Ahr River

1 Einleitung

Das Hochwasser im Juli 2021 hat die Bundesländer Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen schwer getroffen und insgesamt über 180 Tote sowie Schäden in Milliardenhöhe verursacht. Das Ahrtal war besonders betroffen und verzeichnete insgesamt 134 Tote; zwei Personen werden noch vermisst (DKKV, 2022). Historische Hochwasser im Ahrtal haben auch in der Vergangenheit zu zahlreichen Toten sowie erheblichen Schäden geführt, wie Fotos aus dem Jahr 1910 eindrucksvoll dokumentieren (Abb. 1).

Neben den operativen Hochwasservorhersagen stellen die aktuellen Gefahrenkarten, die im Rahmen der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL, 2007) erstellt wurden, bei solchen extremen Ereignissen eine entscheidende Stütze bei der Katastrophenbewältigung dar. Die Hochwasservorhersagen in Deutschland beschränken sich derzeit größtenteils auf die Vorhersage von Abflüssen und Wasserständen an einzelnen Pegeln. Die Gefahrenkarten zeigen, welche Gebiete oder z. B. kritische Infrastrukturen bei einem bestimmten Abfluss in welchem Ausmaß (Überflutungshöhe) überflutet werden.

Die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates (HWRM-RL, 2007) verpflichtet die Mitgliedstaaten der Europäischen Union zur Erstellung von Hochwassergefahren- und -risikokarten für große Teile ihrer Fließgewässer. Im Zuge der Umsetzung dieser Richtlinie und in Anlehnung an Empfehlungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2018) werden in Deutschland seit 2013 Hochwassergefahrenkarten für (1) Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit (~10 bis 20 Jahre), (2) Hochwasser mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (Wiederkehrperiode von 100 Jahren) und (3) Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit (Wiederkehrperiode ≥ 200 Jahre) oder Szenarien von Extremereignissen erstellt und veröffentlicht sowie alle sechs Jahre aktualisiert. Unter Szenarien von Extremereignissen werden solche verstanden, die beispielsweise von Versagen von Hochwasserschutzanlagen oder Verklausung von Brücken ausgehen (LAWA, 2018). In der Praxis werden Szenarien von Versagen von Hochwasserschutzanlagen mit Hochwasserwiederkehrperioden von

über 200 Jahren kombiniert und als sogenannte "Gefahrenkarten HQextrem" dargestellt. Die Festlegung von Wiederkehrperioden für Extremhochwasser (HQextrem) in Deutschland ist jedoch uneinheitlich (PETROW & THIEKEN, 2015). Während zum Beispiel in Brandenburg¹ und Sachsen-Anhalt (LHW, 2014) die Wiederkehrperiode von 200 Jahren (HQ200) angenommen wird, wird in Sachsen² teilweise HQ300 verwendet. In Niedersachsen wird HQextrem mit einem Multiplikationsfaktor von HQ100 abgeleitet ($HQ_{\text{extrem}} = 1.6 \cdot HQ_{100}$)³. Auch in Rheinland-Pfalz werden verschiedene Faktoren genutzt. Konkret im Ahr-Einzugsgebiet wird ein Faktor von 1,26 verwendet⁴. Das Hochwasserregionalisierungsverfahren, das in Baden-Württemberg verwendet wird, ergibt die Jährlichkeit für HQextrem in der Größenordnung von ca. 1.000 Jahren (LUBW, 2015).

Wie bereits mehrfach untersucht, ist die Abschätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten insbesondere im Bereich der höheren Quantile sehr sensitiv zu der Länge der verwendeten Zeitreihe (z. B. HU et al., 2020). Insbesondere kann die Berücksichtigung historischer Extremereignisse die Abschätzung von Hochwasserjährlichkeiten deutlich beeinflussen (DWA, 2012). Für die Erstellung von Hochwasserszenarien bei der Gefahrenkartierung ist die Berücksichtigung von historischen Hochwassern jedoch nicht explizit vorgeschrieben (LAWA, 2018). Lediglich empfiehlt das aktuelle DWA-Merkblatt zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten (DWA, 2012) unter anderem die temporäre Informationserweiterung zur Verbesserung von Hochwasserabschätzungen durch Einbeziehung historischer Informationen und stellt einen entsprechenden methodischen Rahmen vor. Eine systematische Berücksichtigung von historischen Hochwassern in der Extremwertstatistik für die Hochwassergefahrenkartierung scheint in Deutschland bisher nicht umfassend stattzufinden. Das kann an umfangreichen, räumlich verstreuten

- 1 <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/hochwasserschutz/hochwasserrisikomanagementrichtlinie/gefahren-und-risikokarten/#>
- 2 <https://www.wasser.sachsen.de/hochwassergefahrenkarte-11915.html>
- 3 https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/hochwasser_amp_kustenschutz/hochwasserrisikomanagement_richtlinie/hochwassergefahren_und_hochwasserrisikokarten/hochwasserkarten-121920.html
- 4 Ch. Iber (Landesamt für Umwelt, persönliche Kommunikation, 18. Januar 2022)



Abbildung 1

Fotos von der Flutkatastrophe im Ahrtal am 13. Juni 1910 (Sammlung Dr. M. Deutsch, Erfurt).
Photos of the flood disaster in the Ahr Valley on June 13th, 1910 (Collection of Dr. M. Deutsch, Erfurt).

und unsicheren Informationen zu Hochwasserhöchstständen (Hochwassermarken) liegen, die mit einem erheblichen Aufwand erfasst und in Spitzenabflüsse umgerechnet werden müssten. Zudem wurden Flussläufe und Einzugsgebiete durch technische Maßnahmen (Begradigungen, Bau von Speichern wie Tal-sperren und Rückhaltebecken) verändert, dass die Übertrag-barkeit der historischen Abflüsse auf die Gegenwart in vielen Gebieten fragwürdig ist. Dennoch könnte die Berücksichtigung historischer Informationen trotz erheblicher Unsicherheiten bei der Schätzung von Spitzenabflüssen die Abschätzung der Hoch-wasserquantile erheblich beeinflussen und insbesondere bei relativ kurzen gemessenen Zeitreihen die Plausibilität erhöhen (DWA, 2012; SCHUMANN, 2007). Es ist davon auszugehen, dass die historischen Hochwasserinformationen das Bewusstsein für Hochwasserrisiko erhöhen und die Überraschungseffekte, wie sie beispielweise bei der Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 auf-getreten sind, minimieren würden.

Es erscheint daher wichtig, die statistische Grundlage für die Abschätzung der Hochwassergefährdung kontinuierlich zu aktu-alisieren und zu verbessern und, wo sinnvoll und möglich, histo-rische Hochwasser in die Abschätzung der Hochwasserquantile einzubeziehen. Im Nachgang der Hochwasserkatastrophe 2021 stellt diese Arbeit eine Abschätzung der Hochwassergefährdung

im unteren Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hoch-wasser vor. Basierend darauf werden Empfehlungen zur Aktuali-sierung von Gefährdungskarten abgeleitet und diskutiert.

2 Datengrundlage

Das Einzugsgebiet der Ahr hat eine Fläche von ca. 900 km² und entwässert das Mittelgebirge der Ahr-Eifel in den Rhein bei Sinzig (Abb. 2).

Die 86 km lange Ahr ist mehrfach bepegelt, mit Pegeln in Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf bei Sinzig. Dazu kommen weitere Wasserstandspegel an den Zuflüssen. Für die Analyse der Hoch-wasserstatistik im Ahrtal wurden vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz bereitgestellte Abflusswerte am Pegel Altenahr im Zeitraum von 1946 bis 2019 (geprüfte Tagesmittelwerte) (Abb. 3) und von 1991 bis 2019 (geprüfte 15-Minuten-Werte) herangezogen. Die Einzugsgebietsgröße am Pegel Altenahr beträgt 746 km². Diese Messdaten wurden durch die rekonstruierten Abflusswerte der historischen Hochwasser nach ROGGEN-KAMP & HERGET (2014) ergänzt. Diese Abschätzung basiert auf historischen Hochwassermarken und auf der Rekonstruktion von historischen Querprofilen. Dabei wurden die in Tabelle 1 zusam-mengefassten Abflusswerte inklusive der abgeschätzten Unsi-

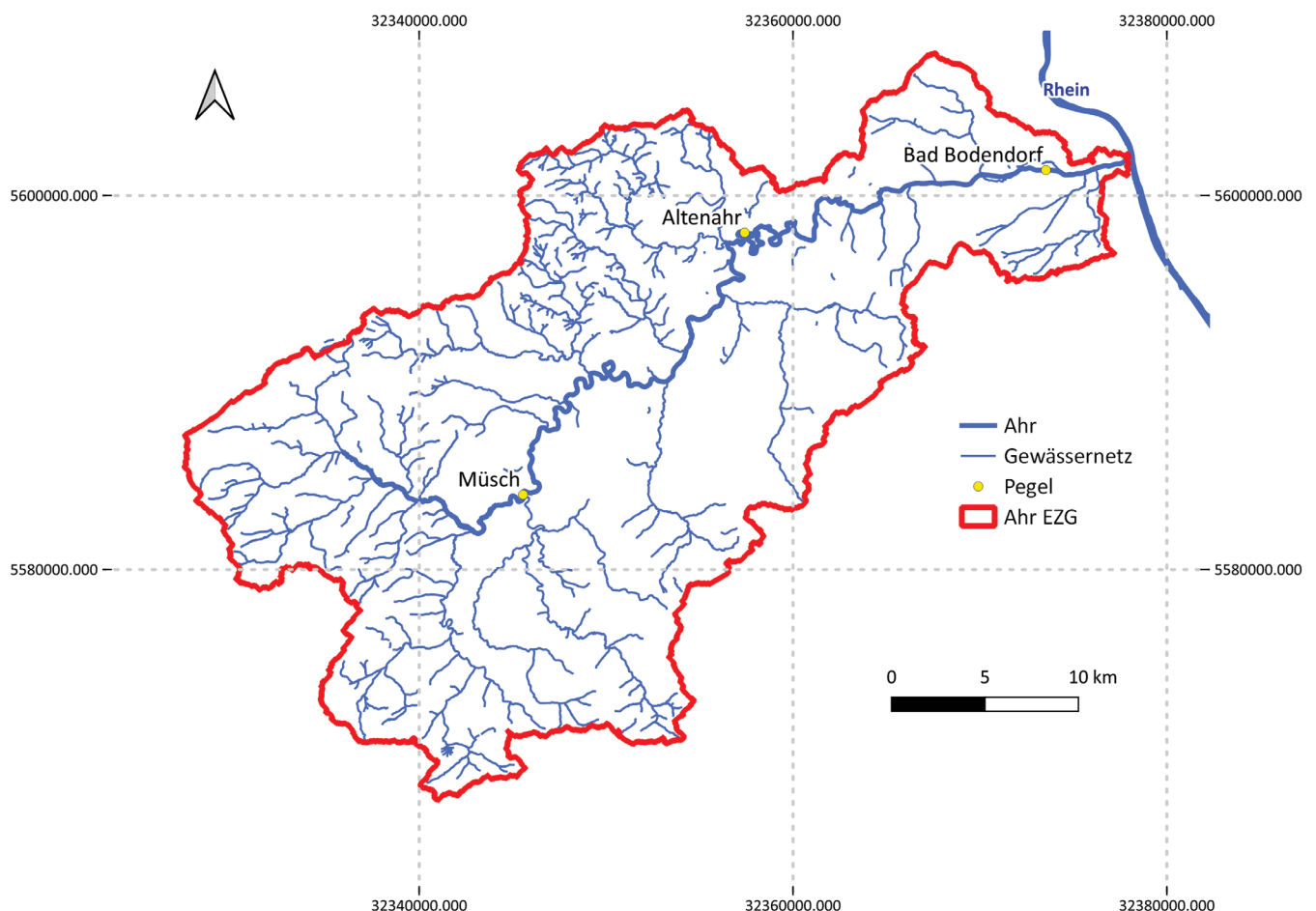


Abbildung 2

Das Ahr-Einzugsgebiet, das Gewässernetz und die Pegellage.
The Ahr catchment, river network and location of gauges.

Tabelle 1

Übersicht von abgeschätzten Spitzenabflüssen für historische Hochwasser am Pegel Altenahr (ROGGENKAMP & HERGET, 2014). *Die Spitzenabflüsse für das Hochwasser 1804 wurden hier vom Standort Dernau (ca. 10 km flussabwärts) durch eine 10%-Reduktion abgeschätzt. Diese Reduktion entspricht dem Verhältnis zwischen den Abflüssen bei Altenahr und Dernau für andere historische Hochwasser.

*Overview of the estimated peak flows for historical floods at Altenahr gauge (ROGGENKAMP & HERGET, 2014). *Peak flows for the 1804 flood were computed here from an estimation at Dernau (c. 10 km downstream) using a 10% reduction factor. This corresponds to the peak discharge ratio at these locations for other historical floods.*

Hochwasser	Minimum	Mittelwert	Maximum
21. Juli 1804	850* m ³ /s	1.090* m ³ /s	1.440* m ³ /s
24. Juni 1888	230 m ³ /s	280 m ³ /s	360 m ³ /s
13. Juni 1910	410 m ³ /s	500 m ³ /s	630 m ³ /s
16. Januar 1918	190 m ³ /s	240 m ³ /s	300 m ³ /s
11. Januar 1920	140 m ³ /s	170 m ³ /s	220 m ³ /s

cherheiten berücksichtigt. Die Unsicherheiten stammen aus der Variation der Rauigkeitsbeiwerte während der Rekonstruktion (ROGGENKAMP & HERGET, 2014).

Die Abschätzung des Spitzenabflusses für das Ereignis im Jahr 1804 liegt allerdings nur für den Ort Dernau wenige Kilometer flussabwärts vom Pegel Altenahr vor. Die Abflusswerte für den Pegel Altenahr wurden daher aus dem Verhältnis zwischen den rekonstruierten Abflüssen für das Ereignis in 1910 (ROGGENKAMP & HERGET, 2014) abgeschätzt und betragen etwa 90 % der Abflussspitze bei Dernau.

Abbildung 3 zeigt, dass der Großteil der maximalen Jahresabflüsse Winterereignisse waren. Jedoch sind die größten historischen Hochwasser sowie das größte gemessene Hochwasser (2016) im Sommer aufgetreten.

Zum jetzigen Zeitpunkt liegt keine verlässliche Abschätzung des Spitzenabflusses für das Hochwasser im Juli 2021 vor. Die Pegel Müsch und Altenahr wurden durch die Hochwasserwelle vor dem Erreichen des Höchststands vollständig zerstört. Eine erste Rekonstruktion durch ROGGENKAMP & HERGET (2022) anhand von Hochwassermarken geht von einem Spitzenabfluss

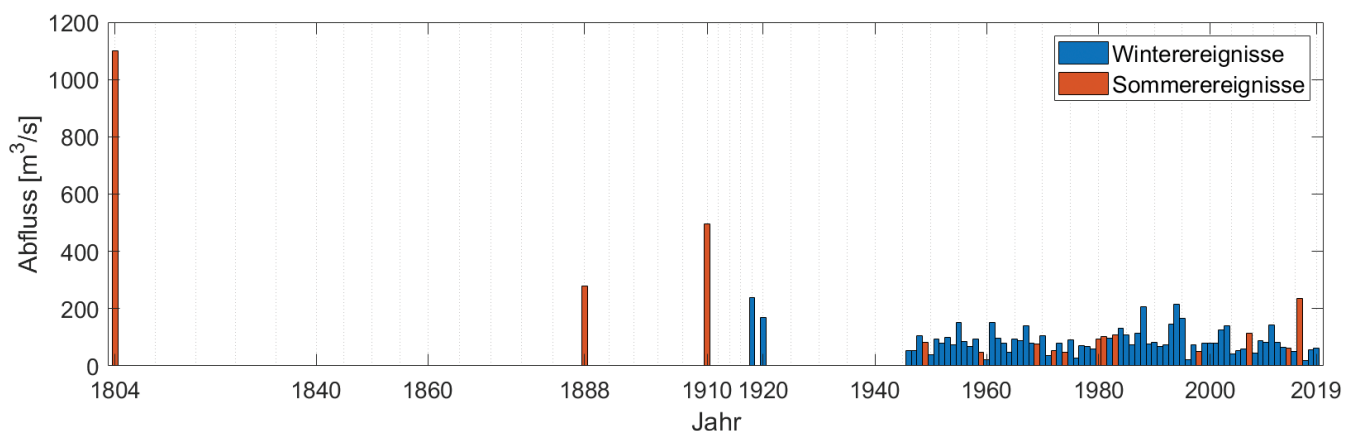
zwischen 1.000 und 1.200 m³/s am Pegel Altenahr aus, was etwa dem höchsten historischen rekonstruierten Abfluss im Jahr 1804 entspricht. In dieser Arbeit nehmen wir für den Spitzenabfluss beim Juli-Hochwasser 2021 den gleichen Wert von 1.090 m³/s wie beim Hochwasser 1804 an.

Um die Abflüsse am Pegel Altenahr in die Wasserstände umzurechnen, wurde eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung am Pegel Altenahr aufgestellt, die sich auf aktuelle Abfluss- und Wasserstandsmessungen im Zeitraum von 2016 bis 2019 stützt. Die Berechnung der Hochwassergefährdung, konkret von Überflutungsflächen und räumlich verteilten Wassertiefen, mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell (Kap. 3.2) erfolgte auf der Grundlage des Digitalen Geländemodells (DGM) mit einer Auflösung von 10 x 10 m vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

3 Methoden

3.1 Extremwertstatistik

Die Extremwertstatistik am Pegel Altenahr wurde auf Basis von jährlichen maximalen Abflüssen in den hydrologischen Jahren (vom 1. November bis 31. Oktober des Folgejahres) aus den o. g.

**Abbildung 3**

Maximale jährliche Spitzenabflüsse der systematisch gemessenen und historischen Hochwasser am Pegel Altenahr aufgeteilt nach Winter- (November bis April) und Sommerereignissen (Mai bis Oktober).

Annual maximum peak discharge of systematically measured and historical floods at Altenahr gauge split into winter (November to April) and summer (May to October) events.

Zeitreihen abgeleitet. Aufgrund der relativ geringen Einzugsgebietsgröße ist es zunächst erforderlich, die Spitzenabflüsse für das jeweilige Jahr aus den vorliegenden Tagesmittelwerten abzuschätzen. Dabei wurde eine Regression ($R^2 = 0,94$) zwischen jährlichen Maxima der Tagesmittelwerte und den entsprechenden Spitzenabflusswerten im Zeitraum 1991 bis 2019 im Zeitfenster von ± 2 Tagen gebildet und anschließend zur Berechnung von Spitzenabflüssen der Jahre 1946 bis 1990 eingesetzt. Die Berechnung von empirischen Wahrscheinlichkeiten (Plotting Positions) erfolgte mittels Weibull-Formel (MAKKONEN, 2006). Zur Berechnung der Jährlichkeiten wurde die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) an die systematisch beobachteten jährlichen Spitzenabflusswerte mittels Methode der L-Momente angepasst (DWA, 2012). GEV wird im Ahrtal für die Ermittlung von Hochwasser-Quantilen vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz eingesetzt.

Die Berücksichtigung von historischen Hochwasserabflüssen (Tab. 1) und deren Unsicherheiten in der Extremwertstatistik erfolgte in Anlehnung an die Methode von BOMERS et al. (2019), der ein Bootstrap-Verfahren zugrunde liegt. Dabei werden die gemessenen Zeitreihen durch wiederholtes Ziehen der Spitzenabflüsse aus dem beobachteten Zeitraum und Auffüllen von Lücken im historischen Zeitraum künstlich verlängert. Dieses Verfahren beruht auf der Annahme, dass sich die Variabilität der Abflüsse im historischen Zeitraum – abgesehen von den historischen Ereignissen – nicht ändert. Die dadurch verlängerte Zeitreihe besteht somit aus (1) synthetisch generierten, (2) historischen und (3) gemessenen jährlichen Spitzenabflüssen. Die Abflusswerte, die im Bootstrap-Verfahren gezogen werden, liegen dabei unter einem zuvor gewählten Schwellenwert. DWA (2012) empfiehlt den Schwellenwert bei dem niedrigsten historischen Hochwasserabfluss festzulegen, was einer "Wahrnehmungsgrenze" für historische Ereignisse entspricht. Im Unterschied zu DWA (2012) empfehlen BOMERS et al. (2019), den Anfang der verlängerten Zeitreihe nicht auf das Jahr des ältesten historischen Hochwassers festzulegen, weil dies die Abschätzung von Jährlichkeiten systematisch verzerrt. Nach SCHENDEL & THONGWICHIAN (2017) wird die Länge der Zeitreihe M über das älteste Hochwasser hinaus verlängert und beträgt aufgerundet auf die ganze Jahreszahl: $M = L + (L + N - 1)/k$, wobei L die Anzahl der Jahre zwischen dem ältesten historischen Hochwasser und dem Beginn der systematischen Messungen darstellt. N ist die Länge der Messzeitreihe und k ist die Anzahl der Hochwasser sowohl in der historischen Reihe als auch in der Messreihe, die den gewählten Schwellenwert überschreiten. Dieser Schwellenwert ändert sich bei jeder Bootstrap-Ziehung je nach gezogenen historischen Abflüssen aus dem Wertebereich.

Die Bootstrap-Methode erlaubt, sowohl die Stichprobenunsicherheit, die durch das zufällige Ziehen entsteht, in der Abschätzung der Hochwasserjährlichkeiten als auch die Unsicherheiten, die mit der Abschätzung historischer Abflusswerte verbunden sind, zu berücksichtigen. Bei Letzteren wurde eine Gleichverteilung zwischen den in der Tabelle 1 angegebenen Randwerten angenommen. Dabei wurde bei allen fünf historischen Hochwassern (Tab. 1) das gleiche Quantil in einer Iteration gezogen, was einer kohärenten Annahme der Rauigkeit entspricht. Für die vorliegende Analyse wurden 10.000 Bootstrap-Iterationen durchgeführt. Es sollte beachtet werden, dass je nach Annahme der historischen Hochwasserabflüsse

im Unsicherheitsbereich unterschiedliche Schwellenwerte bei jeder Bootstrap-Iteration für die o. g. "Wahrnehmungsgrenze" festgelegt werden. Dies beeinflusst die Länge der erweiterten Abflusszeitreihe, die sich zwischen 228 und 260 Jahren bewegt. Die Unsicherheiten, die dadurch entstehen, sind jedoch in dem Konfidenzintervall abgebildet.

3.2 Hydrodynamisch-numerisches Modell RIM2D

Für die Abschätzung der Hochwassergefährdung wurde für die Fließstrecke unterhalb des Pegels Altenahr bis zu Mündung in den Rhein das rasterbasierte zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modell RIM2D auf Basis des DGM10 aufgebaut. Die Größe der Simulationsdomäne beträgt ca. 140 km² und beinhaltet beinahe 1,5 Mio. Gitterzellen. Der Flussschlauch wurde im Modell nur soweit berücksichtigt, wie er im DGM10 abgebildet ist. Es wird hier davon ausgegangen, dass diese Vereinfachung bei der Simulation von extremen Abflüssen in dem relativ seichtem Ahr-Fluss keinen entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Dies wurde durch eine Sensitivitätsanalyse mit dem RIM2D-Modell an der unteren Ahr bestätigt (APEL et al., 2022, in Begutachtung). In RIM2D wird die vereinfachte Flachwassergleichung ohne konvektive Beschleunigung (BATES et al., 2010; DE ALMEIDA et al., 2012) mit der expliziten Finite-Differenzen-Methode numerisch gelöst. Das Modell ist auf NVIDIA-Grafikprozessoren (GPUs) parallelisiert und liefert Informationen zu Überflutungsflächen und maximalen Überflutungstiefen sowie Fließgeschwindigkeiten als Gefährdungsindikatoren.

RIM2D wird mit der Wasserstandsganglinie am Pegel Altenahr als obere Randbedingung angetrieben. Die Wasserstände wurden aus der W/Q-Beziehung abgeleitet, die anhand von Abfluss- und Wasserstandsmessungen in den Jahren 2016 bis 2019 aufgestellt wurde ($R^2 = 0,995$). Der ausgewählte Zeitraum beinhaltet auch den größten systematisch gemessenen Abfluss vor Juli 2021 von 236 m³/s (gemessen am 2. Juni 2016). In RIM2D werden die Wassertiefen in jedem Zeitschritt auf die Gewässerzellen am Pegel Altenahr aufgeprägt. Als untere Randbedingung wird die Normaltiefe am Rand der Simulationsdomäne angenommen, was einem Wasserspiegelgradienten gleich dem Geländegradienten am Modellrand entspricht. Weitere laterale Zuflüsse entlang der Strecke wurden nicht berücksichtigt, sollten aber im Vergleich zum Abfluss im Hauptstrom relativ gering sein. Die räumlich verteilten Rauigkeitsbeiwerte nach Manning wurden entsprechend der Landnutzung nach CORINE (2018) wie folgt mit Standardwerten parametrisiert: bebauter Raum: 0,02; Wald: 0,05; alle übrigen Flächen: 0,03.

Für das Hochwasser im Juli 2021 wurde das Modell RIM2D mithilfe der vom Landesumweltamt Rheinland-Pfalz kartierten Überflutungsflächen und gemeldeten Hochwassermarken validiert. Die erzielten hohen Übereinstimmungen der Überflutungsflächen und auch mit den Hochwassermarken belegen die Validität des Modells und der Simulationen (APEL et al., 2022, in Begutachtung).

4 Ergebnisse

Die Hochwasserstatistik nach Anpassung einer Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an die 74-jährige beobachtete Zeitreihe von Spitzenabflusswerten ist in Abbildung 4 dargestellt. Die historischen Hochwasser wurden bei der Anpassung zunächst

nicht berücksichtigt, sind aber in die angepasste Verteilung eingeordnet.

Es wird zunächst deutlich, dass das GEV-Modell eine sehr gute Anpassung an die beobachteten Spitzenabflüsse liefert. Die entsprechenden Quantile sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es ist davon auszugehen, dass jeweils ähnliche Abflusswerte von HQ100 und HQextrem für die Erstellung von amtlichen Gefahrenkarten zugrunde gelegt wurden. Der Ausschnitt um die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler in Abbildung 5 zeigt eine relativ geringe Gefährdung von bebauten Flächen für das amtliche HQextrem-Szenario⁵. Der Vergleich mit den im Juli 2021 auf-

⁵ <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de>

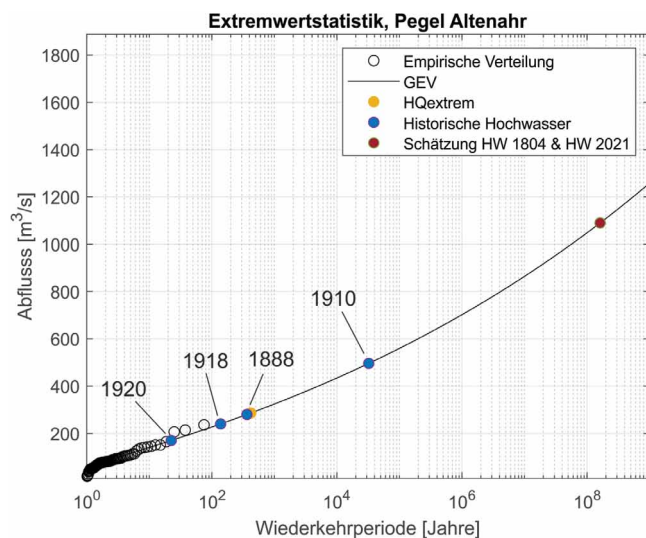


Abbildung 4

Anpassung der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an die beobachteten jährlichen Spitzenabflüsse am Pegel Altenahr (1946 bis 2019). Die historischen Hochwasserabflüsse sowie die Schätzungen von HQextrem und dem Hochwasser 2021 sind in die Verteilung eingeordnet. *Generalized Extreme Value distribution fitted to the empirical plotting positions of the observed annual maximum instantaneous peak flows at Altenahr gauge (1946 to 2019). The historical flood flows as well as the estimation of the HQextrem and the flood in 2021 are indicated.*

getreten Überflutungsflächen deutet auf eine Unterschätzung der Hochwassergefahr hin.

Die angepasste Verteilung hat einen relativ geringen Shape-Parameter ($\xi = 0,06$). Die theoretisch abgeschätzte Jährlichkeit für das Hochwasser 2021 (HW2021) würde laut diesem Modell bei etwa 100 Millionen Jahren liegen. Die aufgezeichneten historischen Hochwasser (mediane Schätzung) zeigen jedoch, dass es in den letzten 218 Jahren inklusive des Hochwassers vom Juli 2021 bereits drei Ereignisse gab (1804, 1910, 2021), die über dem abgeschätzten HQextrem lagen, dessen Abfluss einer Wiederkehrperiode von 419 Jahren entspricht (Tab. 2). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die in Abbildung 4 dargestellte Verteilung die Statistik der Grundgesamtheit nicht verlässlich abbildet.

Die Berücksichtigung von historischen Hochwassern und deren Unsicherheiten ergibt eine andere Extremwertverteilung mit deutlich höherem Shape-Parameter (Abb. 6). Der Median des Shape-Parameters liegt bei $\xi = 0,26$ und streut je nach Stichprobe im Bootstrap-Verfahren zwischen etwa 0,1 und 0,4. Das deutet auf eine Verteilung mit einem schweren Rand hin. Als solche bezeichnet man eine Verteilung, deren Rand langsamer abfällt als der Rand einer exponentiellen Verteilung; die Wahrscheinlichkeiten von Extremen sind dabei größer als bei der exponentiellen Verteilung. Demzufolge resultieren aus dieser Verteilung deutlich höhere Abflussschätzungen für HQ100, HQextrem und HQ1000 sowie deutlich geringere Wiederkehrperioden für HQextrem, d. h. für das größte historische Hochwasser 1804 und das Hochwasser 2021 (Tab. 2). Bemerkenswerterweise halbiert sich nahezu die (mediane) Wiederkehrperiode von HQextrem von 419 auf 221 Jahre, und die untere Grenze des 90%-Konfidenzintervalls fällt mit 80 Jahren sogar unter die Marke der 100-jährlichen Wiederkehrperiode.

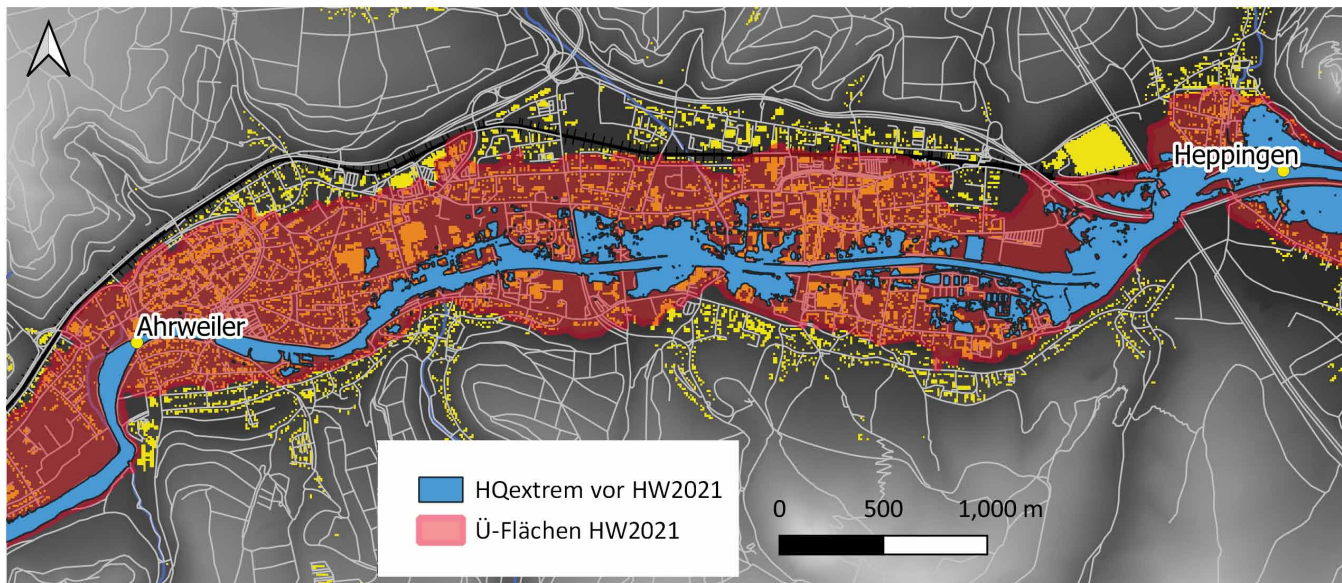
Die geschätzten Jährlichkeiten für das Hochwasser 2021 reduzieren sich deutlich, liegen dennoch in einem vier- bis fünfstelligen Bereich (Tab. 2). Trotz der synthetischen Erweiterung der Abflusszeitreihe im Bootstrap-Verfahren auf über 200 Jahre sind deutliche Abweichungen der angepassten GEV von den historischen Hochwassern im Extrembereich zu beobachten (Abb. 6). Die synthetischen Stichproben werden stark von vielen kleineren Hochwassern dominiert, sodass die extremen Ausreißer nicht durch die angepasste GEV getroffen werden.

Tabelle 2

Geschätzte Abflüsse für ausgewählte Jährlichkeiten am Pegel Altenahr mit und ohne Berücksichtigung historischer Hochwasser. Abschätzung der Jährlichkeiten für HQextrem, Hochwasser 1804 und für die vorläufige Schätzung des Spitzenabflusses im Juli 2021. Die Jährlichkeit von HQextrem bezieht sich auf den abgeleiteten Abfluss für HQextrem. *Estimation of discharges for selected flood quantiles at Altenahr gauge with and without consideration of historical floods. Estimation of return periods for HQextrem, 1804 flood are based on the provisional estimate of peak flow in July 2021. The return period for HQextrem corresponds to the computed discharge value for HQextrem.*

	GEV (1946 bis 2019) ohne historische Hochwasser	GEV mit historischen Hochwassern (5- bis 95-Perzentil)
HQ100	227 m³/s	315 (269, 365) m³/s
HQextrem (1,26 * HQ100)	286 m³/s	397 (339, 460) m³/s
HQ1000	322 m³/s	609 (465, 795) m³/s
HQextrem (GEV)	419 Jahre	221 (80, 985) Jahre
HW1804/HW2021	> 10⁸ Jahre	8.663 (2.645, 58.731) Jahre

Um die Hochwassergefährdung im Unterlauf des Pegels Altenahr abzuschätzen, wurde das hydrodynamisch-numerische Modell RIM2D zum einen mit der medianen Schätzung von HQ1000 (609 m³/s = 5,46 m Wasserstand Pegel Altenahr) und zum anderen mit dem höchsten geschätzten historischen Spitzenabfluss im Jahr 1804 von 1.090 m³/s angetrieben, was einem Wasserstand am Pegel Altenahr von 7,29 m entspricht. Die Ermittlung von Wasserständen entsprechend der Abflusswerte erfolgte mit der in Kapitel 3.2 eingeführten W/Q-Beziehung. Für die Ableitung der Randbedingung für die Simulation wurde die Abflussganglinie des bisher höchsten systematisch gemessenen Hochwasserereignisses vom 2. Juni

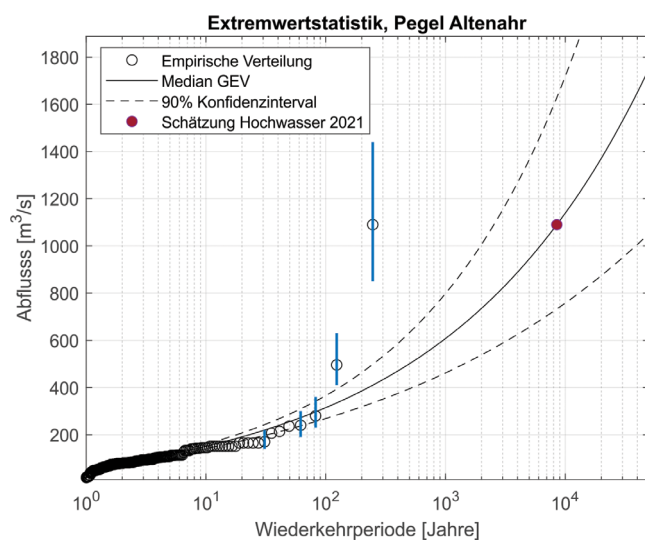

Abbildung 5

Ausschnitt der Hochwassergefahrenkarte für HQextrem (amtliche Schätzung vor dem Hochwasser 2021, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz) bei der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler. Ausdehnung von Überflutungsflächen beim Hochwasser 2021.

Section of flood hazard map for HQextrem (official estimation prior to July 2021 flood, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz) at the town of Bad Neuenahr-Ahrweiler. Inundation area during the 2021 flood.

2016 als Grundlage genommen, auf den Spitzenabfluss normiert und anschließend auf die Wasserstände des HQ1000 und den Spitzenabfluss von 1804 bzw. von 2021 hochskaliert. Mit der Annahme der Abflussganglinie von 2016 wird auf die Daten-

grundlage zurückgegriffen, wie die vor dem Hochwasser 2021 zur Verfügung stand. Im Weiteren wird deshalb vom Hochwasser-szenario HW1804 gesprochen und nicht vom HW2021, weil die Hydrographen Form des synthetischen Szenarios nicht der Hochwasserwelle im Juli 2021 entspricht, wohl aber dessen Spitzenabfluss.

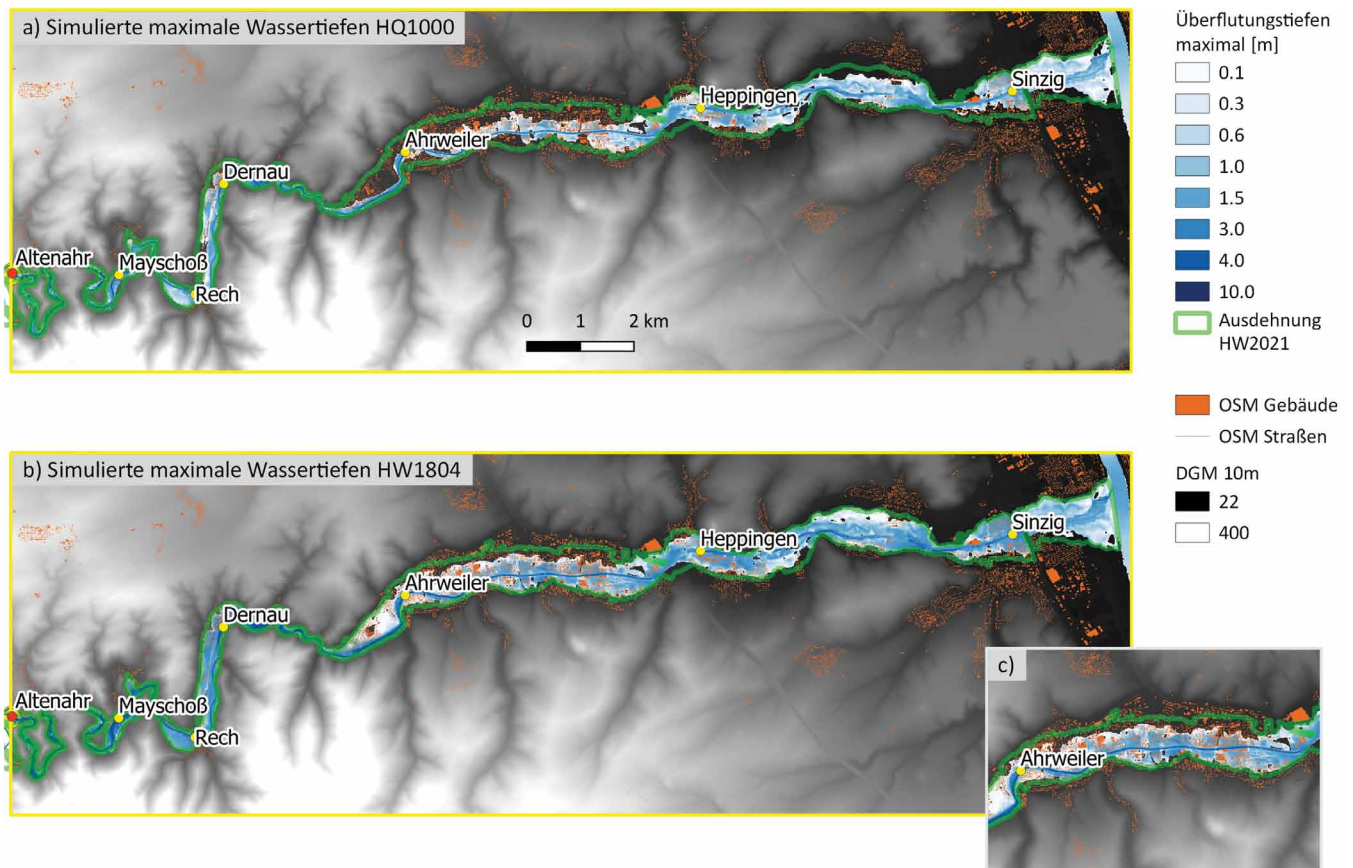

Abbildung 6

Anpassung der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an die synthetisch erweiterte Abflusszeitreihe am Pegel Altenahr unter Berücksichtigung historischer Hochwasser. Blaue Balken stellen die Unsicherheiten der Schätzung von Abflüssen bei fünf historischen Hochwassern dar. Die Schätzung des Hochwassers im Juli 2021 ist in die Verteilung eingeordnet.

Generalized Extreme Value distribution fitted to the empirical plotting positions of the synthetically extended peak flows at Altenahr gauge considering historical floods. Blue bars show the uncertainty in estimation of peak flows for five historical events. The estimation of the 2021 flood flow is indicated.

Abbildung 7 zeigt die simulierten Überflutungsflächen und maximalen Überflutungstiefen für HQ1000 und HW1804 (Hochwasser 1804). Beide Simulationen zeigen im Vergleich zum bislang geltenden HQextrem (Abb. 5) wesentlich größere überflutete Bereiche und höhere Überflutungstiefen. Der Ausschnitt in Abb. 7c zeigt den gleichen Flussabschnitt wie in Abb. 5. Erwartungsgemäß ist das Ausmaß der Überflutung des HW1804 größer als beim HQ1000. In beiden Fällen sind die Ortschaften im mäandrierenden und tief eingeschnittenen Abschnitt der Ahr zwischen Altenahr und Bad Neuenahr-Ahrweiler stark betroffen und zu großen Teilen überflutet. Die Wasserstände der Ahr erreichen hier im Falle des HW1804 die 10-m-Marke über der Geländeoberfläche, was auch beim HW2021 beobachtet wurde und zu einer enormen Gefährdung in bewohnten Bereichen geführt hat. Weiterhin sind auch große Teile der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler und alle unterstrom gelegenen Kommunen stark betroffen. Das modellierte HW1804 erreicht dabei fast die kartierte Ausbreitung des HW2021.

Der Unterschied ist einerseits durch unterschiedliche Hydrographenfülle zu erklären. Des Weiteren konnten APEL et al. (2022) mithilfe einer rekonstruierten Wasserstandsganglinie am Pegel Altenahr, welche die während des Hochwassers beobachteten Verklausungen der Brücken berücksichtigt, zeigen, dass durch die dadurch höheren Wasserstände die Überflutungsflächen und auch Hochwassermarken mit demselben Modellaufbau sehr gut simuliert werden konnten. Dieser Effekt ist durch die direkte Abschätzung der Wasserstände aus der aktuellen W/Q-Beziehung

**Abbildung 7**

Hydrodynamisch-numerische Simulation von Überflutungstiefen für ein Hochwasserszenario (a) HQ1000 = 609 m³/s und (b) HW1.804 = 1.090 m³/s am Pegel Altenahr und der Vergleich mit kartierten Überflutungsflächen des HW2021 (Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz). Vergrößerung in c) zeigt den Überflutungsbereich in der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler für das modellierte HW1804.

Hydrodynamic simulation of inundation depths for a flood scenario with peak flow of (a) HQ1000 = 609 m³/s and (b) HW1804 = 1090 m³/s at Altenahr gauge and comparison with the mapped inundation extent of the 2021 flood (Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz). The inset in c) shows inundation area in the town Bad Neuenahr-Ahrweiler for the simulated 1804 flood.

Altenahr nicht berücksichtigt und wurde auch bei der Rekonstruktion des HW1804 nicht in Betracht gezogen.

5 Diskussion

Die Ausweisung von Überschwemmungsgrenzen für das HQ100 hat im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) eine klar definierte Funktion: die amtliche Festsetzung von Überschwemmungsgebieten. Das WHG regelt weiterhin die Bebauung und Nutzung in festgesetzten Überschwemmungsgebieten. Zusätzlich überschwemmte Flächen aus den Hochwassergefährdungskarten für HQextrem werden im WHG als Risikogebiete bezeichnet, in denen Maßnahmen der Bauvorsorge umgesetzt werden sollen. Sie dienen im Allgemeinen als Grundlage für die kommunale Planung (z. B. Siedlungsplanung, Bauvorsorge), Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz (z. B. Evakuierungsplanung) sowie individuelle Gefahrenabschätzung (LAWA, 2018). Derzeit existiert in Deutschland keine einheitliche Festlegung für Quantile, die für die Abschätzung der Hochwassergefährdung durch HQextrem eingesetzt werden. Diese schwanken zwischen HQ200 (z. B. in Brandenburg und Sachsen-Anhalt) und über HQ1000 in Baden-Württemberg (LUBW, 2015). Die Hochwasserereignisse vom Juli 2021 haben gezeigt, dass die Hochwassergefahrenkarten für HQextrem eine wichtige Funktion haben, die darin besteht,

die betroffene Bevölkerung und das Katastrophenmanagement möglichst vor Überraschungen durch Extremereignisse zu schützen, indem diese Bereiche rechtzeitig evakuiert werden. Unerwartete Katastrophenszenarien reduzieren die Handlungsfähigkeit vom Katastrophenmanagement und können zu desaströsen Konsequenzen führen (MERZ et al., 2015). Unter diesem Gesichtspunkt erscheint eine einheitliche Vorgehensweise für die Festlegung von HQextrem sinnvoll, die sich eher an höheren Quantilen z. B. HQ1000 orientiert. Insbesondere im Ahrtal legt die Häufigkeit von historischen Hochwassern jenseits des derzeit verwendeten HQextrem nahe, dass sich das HQextrem eher an höheren Quantilen orientieren sollte. Zusätzlich erscheint es sinnvoll, entweder Modellstudien zum maximal möglichen Hochwasser durchzuführen oder historisch aufgetretene Extremereignisse sorgfältiger auszuwerten und ihre (vermutlich) maximale Ausdehnung in Gefahrenkarten als Zusatzinformation einzuzeichnen. Denn im Fall des Pegels Altenahr zeigt die Extremwertstatistik anhand von systematisch gemessenen Abflussdaten, dass selbst die Wahl von extrem hohen Quantilen (HQ1000 oder HQ10000) den Abfluss und die Überflutungsflächen des aktuellen 2021-Ereignisses sowie bei einigen historischen Ereignissen unterschätzen würde. Zwar sind die wahren Wiederkehrperioden dieser Ereignisse unbekannt, dennoch ist klar, dass selbst die Wahl der o. g. Quantile nicht vor allen Überraschungen schützen kann.

Die Berücksichtigung von historischen Hochwassern in der Extremwertstatistik ist generell und insbesondere im Ahrtal von entscheidender Bedeutung, um Unsicherheiten am oberen Ende der Verteilung zu reduzieren. Es muss jedoch beachtet werden, dass man bei der angewandten Methode die Stationarität der Zeitreihe annimmt. Diese Annahme kann jedoch verletzt sein, wenn die historischen Hochwasser sehr weit in der Vergangenheit bzw. in Zeitperioden liegen, die durch besondere klimatische Bedingungen gekennzeichnet sind. Daher sollte z. B. geprüft werden, ob historische Ereignisse in den sogenannten hochwasserreichen oder hochwasserarmen Perioden liegen (BLÖSCHL et al., 2020; MERZ et al., 2016; SCHMOCKER-FAKEL & NAEF, 2010) und wie die rezente Periode dazu im Verhältnis steht. Zudem wirkt sich der anthropogene Klimawandel bereits auf die Hochwasserentstehung in europäischen Flüssen aus und wird dies auch in der Zukunft tun (BLÖSCHL et al., 2019). Vor diesem Hintergrund gehen die Überlegungen zur Novellierung des DWA-Merkblatts M-552 zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in die richtige Richtung⁶. Darin wird vorgeschlagen, einen stärkeren Fokus auf die Hochwasserstatistik basierend auf Hochwassertypen zu legen und die Zeitreihen systematisch auf Instationaritäten zu prüfen. Es lohnt sich also ein kritischer Blick auf die Auswahl der zu berücksichtigten historischen Ereignisse.

Die vorgestellte Analyse zeigt, dass selbst unter Berücksichtigung von historischen Hochwassern und deren Unsicherheiten das 90%-Konfidenzintervall des HQ1000 die Abflussschätzung für die Hochwasser der Jahre 1804 und 2021 nicht beinhaltet. Es ist anzumerken, dass die angepasste GEV eine deutliche Abweichung von empirischen Wahrscheinlichkeiten im Randbereich aufweist. Sowohl der Abfluss von 1804 als auch von 1910 liegen außerhalb des 90%-Konfidenzintervalls. Einerseits können die wahren Jährlichkeiten dieser Ereignisse deutlich größer sein, als durch die empirischen Wahrscheinlichkeiten dargestellt, auf der anderen Seite könnte es sich bei diesen sehr extremen Ereignissen um Ereignisse handeln, die einer anderen Grundgesamtheit angehören als die kleineren Hochwasser. Das heißt, es sind Ereignisse, die durch besondere meteorologische und hydrologische Prozesse hervorgerufen werden, z. B. durch eine sehr seltene Wettersituation bzw. durch eine besondere Art der Abflussbildung, die zu höheren Abflussbeiwerten führt. In diesen Fällen wäre die Annahme der Homogenität der Stichprobe verletzt und die Anpassung einer Verteilung unzulässig. Es würde sich um eine gemischte Stichprobe handeln, an die eine Mischverteilung anzupassen wäre. Dies erfordert jedoch eine prozessbasierte oder saisonbedingte Identifikation von unterschiedlichen Stichproben, die ausreichende Längen haben sollten. Die entsprechenden Methoden zur Anwendung der saisonalen Extremwertstatistik werden z. B. in DWA (2012), SCHUMANN (2005) und FISCHER et al. (2016) vorgestellt. Somit könnten die Wahrscheinlichkeiten von extremen Ereignissen deutlich höher sein, als aus der GEV hervorgeht. Die saisonale Analyse von Hochwassern im Ahrtal zeigt, dass der größere Teil der Jahresmaxima im Winterhalbjahr auftritt (Abb. 3). Die historischen Extreme treten jedoch sowohl im Winter als auch im Sommer auf, wobei die allergrößten Ereignisse in 1804, 1888 und 1910 sowie das Ereignis im Juli 2021 Sommerereignisse waren. Es gilt daher, die meteorologischen und hydrologischen Prozesse besser zu verstehen, die zu solchen

seltene und besonderen Extremen und somit zum schweren Rand der Verteilung führen.

Wie geht man mit solchen Ausnahmeereignissen um und wie sind diese in den Hochwassergefahrenkarten zu berücksichtigen? Neben der Festlegung eines höheren Quantils, z. B. HQ1000 für die Hochwassergefahrenkarten von HQextrem, empfiehlt sich die Kennzeichnung von potenziellen Überflutungsflächen des größten verlässlich dokumentierten historischen Hochwassers oder eines realistischen synthetischen Worst-Case-Szenarios. Diese zusätzliche Information kann z. B. in Form von Konturlinien auf den Gefahrenkarten dargestellt werden. In Gebieten, wo historische Hochwasser die Abschätzung von HQ1000 deutlich übersteigen, wie im Ahrtal, kann diese Information eine wesentliche Stütze im extremen Katastrophenfall werden, insbesondere für Evakuierungsentscheidungen, die in diesen Fällen Menschenleben retten. Die gleiche Funktion erfüllt die Darstellung von Überflutungsflächen bei Worst-Case-Szenarien, die sich z. B. durch simulierte Maximierung, Ausdehnung oder räumliche Verschiebung von Niederschlagsfeldern, durch Annahmen zum Versagen von Hochwasserschutzanlagen oder zur Verklauung von Durchlässen ergeben können. Auch Szenarien, die zur extremen Abflussbildung führen, z. B. durch einen Infiltrations- oder Sättigungsüberschuss oder durch eine verstärkte Abflusskonzentration in Folge der Erosionsprozessen, verdienen eine besondere Beachtung. In diesem Zusammenhang ist in Mittelgebirgsregionen die Identifizierung und Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten, die das Wasserhaushaltsgesetz ermöglicht, zu prüfen.

Das in dieser Arbeit beispielhaft simulierte Szenario des maximalen abgeschätzten historischen Spitzenabflusses vom HW1804 zeigt eine deutlich stärkere Gefährdung im Bereich der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler als die aktuelle amtliche Gefahrenkarte für HQextrem (Abb. 5 und Abb. 7). Hier hatten auch die meisten Hochwassertodesopfer im Kreis Ahrweiler ihren Wohnsitz (69 von 134, d. h. 51,5 %). Dies unterstreicht die Bedeutung von Extremszenarien für das Katastrophenmanagement.

Die Simulation für das HW1804 übersteigt auch die Überflutungsflächen vom neu geschätzten HQ1000 unter Berücksichtigung historischer Hochwasser und kommt am nächsten an die beobachteten Überflutungsflächen vom Juli 2021. Es zeigt sich, dass die Berechnung und die Gefahrendarstellung von extremen historischen Hochwassern sinnvoll sein können, um die Überraschungseffekte durch aktuelle Ereignisse zu reduzieren. Und dennoch wurden die während des Hochwassers 2021 beobachteten Überflutungsflächen durch die HW1804-Modellsimulation etwas unterschätzt. Verschiedene Faktoren wie die Annahme des Spitzenabflusses und der Ganglinie, die Rauigkeitsparametrisierung sowie vor allem die Verklauung von Brücken und lokale Sedimentumlagerungen spielen dabei eine Rolle. Diese Prozesse können mittels einer Sensitivitätsanalyse und Verklauungsszenarien aber ebenfalls modellhaft abgebildet werden. Es ist zu diskutieren, inwiefern in Mittelgebirgsregionen die Hochwassergefahren durch Extremszenarien mit Geschiebefrachten ergänzt werden sollten. Ereignisse mit ähnlicher Dynamik, z. B. im Mai 2016 in Braunsbach, waren ebenfalls durch hohe Geschiebefrachten und/oder Verklauungen geprägt (VOGEL et al., 2017).

Es ist davon auszugehen, dass die Darstellung von maximalen historischen oder Worst-Case-Szenarien der Hochwasser-

⁶ <https://de.dwa.de/de/regelwerksankuendigungen-volltext/%C3%BCberarbeitung-von-merkblatt-dwa-m-552-ermittlung-von-hochwasser-wahrscheinlichkeiten.html>

gefährdung eine andere Informationsbasis im vorliegenden Katastrophenfall anbieten würde als die amtliche HQextrem-Gefahrenkarte, die zum Zeitpunkt des Ereignisses verfügbar war. Ob dadurch der Verlauf der Hochwasserkatastrophe oder deren Konsequenzen hätten beeinflusst werden können, bleibt eine Spekulation, da die bessere Vermeidung der Hochwasser Auswirkungen von konkreten Entscheidungen des örtlichen Katastrophenschutzes abhängig ist. Wir gehen jedoch davon aus, dass das Katastrophenmanagement und die Bevölkerung mit aktualisierten Hochwassergefahrenkarten und zusätzlichen Informationen zu historischen und Worst-Case-Szenarien auf zukünftige extreme Hochwasserereignisse besser vorbereitet wären.

6 Schlussfolgerungen

Die Analyse der Extremwertstatistik am Pegel Altenahr im Ahr-tal hat deutlich gezeigt, dass die Berücksichtigung historischer Hochwasserereignisse einen starken Einfluss auf die berechneten Hochwasserquantile mittels Generalisierter Extremwertverteilung hat, die für Gefahrenkarten genutzt werden. Zum Beispiel wird die Wiederkehrperiode für HQextrem ohne historische Hochwasser auf 419 Jahren geschätzt; sie sinkt bei Berücksichtigung von historischen Ereignissen auf 221 Jahre (Median). Die geschätzte Wiederkehrperiode des Juli-Hochwassers 2021 sinkt von theoretisch über 100 Millionen Jahren auf etwa 8.600 Jahre (Median). Obwohl die wahren Wahrscheinlichkeiten der Hochwasserextreme nicht bekannt sind, erscheint die zweite Schätzung deutlich plausibler, zumal es in den letzten 218 Jahren bereits drei Hochwasser inklusive des Juli-Hochwassers 2021 gab, die den berechneten Spitzenabfluss von HQextrem überschritten haben. Trotz dieser großen Unsicherheiten sollte in Zukunft eine systematische Berücksichtigung historischer Hochwasser in der Extremwertstatistik in der wasserwirtschaftlichen Praxis stattfinden, da diese Unsicherheiten um Größenordnungen geringer erscheinen als solche, die ohne Berücksichtigung von historischen Ereignissen für HQextrem erzielt werden.

Der Vergleich von amtlichen HQextrem-Gefahrenkarten mit den Überflutungsflächen vom Hochwasser 2021 zeigt, dass die Bestimmung von Hochwasserquantilen ohne Berücksichtigung historischer Ereignisse für die Gefahrenkartierung unangemessen ist, um die Gefährdung im Ahr-tal adäquat wiederzugeben und die Bevölkerung und das Katastrophenmanagement über die Gefahr von seltenen und extremen Hochwassern zu informieren. Die hydrodynamisch-numerischen Simulationen des HQ1000 unter Berücksichtigung historischer Ereignisse und des größten historischen Hochwassers von 1804 zeigten, dass diese Szenarien deutlich besser die tatsächlichen Überflutungsflächen des Hochwassers vom Juli 2021 wiedergeben. Es erscheint daher sinnvoll, die Bestimmung für HQextrem bundesweit einheitlich auf ein höheres Quantil, z. B. HQ1000, festzulegen, um die potenziell betroffene Bevölkerung und das Katastrophenmanagement vor Überraschungen durch seltene, extreme Hochwasser besser zu schützen. Zusätzlich wird vorgeschlagen, Hochwasserszenarien für das größte, verlässlich dokumentierte historische Hochwasser und/oder Worst-Case-Szenarien in Hochwassergefahrenkarten gesondert darzustellen. Dies würde helfen, die Erinnerungskultur an vergangene Hochwasserkatastrophen über Generationen aufrechtzuerhalten und – gerade vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels, der die Extreme verstärken könnte – die private Hochwasservorsorge

und Vorbereitung zu fördern sowie die Entscheidungen im Hochwasserrisikomanagement zu unterstützen.

Conclusions

The analysis of extreme value statistics at the Altenahr gauge on the river Ahr Valley clearly shows that considering historical flood events has a significant impact on flood quantiles computed with the GEV distribution. These quantiles are used to generate flood hazard maps. For example, the estimated return period of the extreme flood scenario (HQextrem) drops from 419 years without considering historical events to 221 years (median) in the statistics with historical floods. The estimated return period of the peak estimate for the 2021 flood changes from theoretically over 100 million years down to about 8600 years (median). Though the true probabilities of flood extremes are unknown, the second estimate seems to be more realistic, particularly considering the fact that in the past 218 years there were already three floods, including the one in 2021, which exceeded the peak flow adopted for HQextrem. Despite considerable uncertainties, we suggest systematically considering historical floods in extreme value analysis for practical applications.

The comparison of the official HQextrem flood extent with the inundation areas of the 2021 flood shows that the definition of flood quantiles without considering historical floods is inadequate for hazard estimation and for informing the population and disaster management about very rare and extreme events. The hydrodynamic modelling of a 1000-year flood scenario considering historical floods and of the largest historical flood in 1804 shows that these scenarios much better reflect the inundation areas of the 2021 flood. Based on this analysis, it seems reasonable to define a country-wide homogeneous return period for an HQextrem scenario at a higher quantile, e.g. 1000-year flood, in order to better safeguard the potentially affected population and disaster management from malign surprises caused by rare and extreme floods. Additionally, we suggest mapping the extent of the largest reliably documented historical floods and/or synthetic worst-case scenarios in the official flood hazard maps. This would help to uphold the collective memory over generations. In particular in view of the progressing climate change which may aggravate extremes, this would foster private precaution measures and support flood risk management decisions.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Task-Force-Aktivitäten zum Hochwasser 2021 im DFG Graduiertenkolleg "Natural Hazards and Risks in a Changing World" (NatRiskChange) (GRK 2043/2) initiiert und im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts KAHR (Förderkennzeichen 01LR2102F) fortgeführt. Für die Bereitstellung von Daten danken wir dem Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

Anschrift der Verfasser

Dr. Sergiy Vorogushyn
Dr. Heiko Apel
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion Hydrologie
Telegrafenberg
14471 Potsdam

sergiy.vorogushyn@gfz-potsdam.de
heiko.apel@gfz-potsdam.de

Prof. Dr. Annegret Thieken
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24-25
14476 Potsdam-Golm
annegret.thieken@uni-potsdam.de

Matthias Kemter
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24-25
14476 Potsdam-Golm
Zusätzliche Affiliation mit dem Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam und dem Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
matthias.kemter@uni-potsdam.de

Literatur- und Quellenverzeichnis

- APEL, H., VOROGUSHYN, S. & B. MERZ (2022): Brief communication – Impact Forecasting Could Substantially Improve the Emergency Management of Deadly Floods: Case Study July 2021 floods in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-10. DOI: 10.5194/nhess-2022-33, in Begutachtung.
- BATES, P.D., HORRITT, M.S. & T.J. FEWTRELL (2010): A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modeling. *Journal of Hydrology*, 387(1-2), 33-45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.027.
- BLÖSCHL, G., HALL, J., VIGLIONE, A., PERDIGÃO, R.A.P., PARAJKA, J. et al. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
- BLÖSCHL, G., KISS, A., VIGLIONE, A., BARRIENDOS, M., BÖHM, O. et al. (2020): Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560-566. DOI: 10.1038/s41586-020-2478-3.
- BOMERS, A., SCHIELEN, R.M.J. & S.J.M.A. HULSCHER (2019): Decreasing uncertainty in flood frequency analyses by including historic flood events in an efficient bootstrap approach. *Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1895-1908. DOI: 10.5194/nhess-19-1895-2019.
- LUBW (2015): Abfluss-BW. Regionalisierte Abfluss-Kennwerte Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 80 Seiten.
- DE ALMEIDA, G.A.M., BATES, P., FREER, J.E. & M. SOUVIGNET (2012): Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. *Water Resources Research*, 48(5), W05528. DOI: 10.1029/2011WR011570.
- DKKV (2022): Die Flutkatastrophe im Juli 2021. Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft. DKKV-Schriftenreihe Nr. 62, Bonn
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 94 Seiten.
- FISCHER, S., SCHUMANN, A. & M. SCHULTE (2016): Characterization of seasonal flood types according to timescales in mixed probability distributions. *Journal of Hydrology*, 539, 38-56.
- HU, L., NIKOLOPOULOS, E.I., MARRA, F. & E.N. ANAGNOSTOU (2020): Sensitivity of flood frequency analysis to data record, statistical model, and parameter estimation methods: an evaluation over the contiguous United States. *Journal of Flood Risk Management*, 13(1), e12580. DOI: 10.1111/jfr3.12580.
- HWRM-RL (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union, L288/28.
- LAWA (2018): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. 156. LAWA-Vollversammlung, Weimar, 77 Seiten.
- LHW (2014): Umsetzung der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie im Land Sachsen-Anhalt. Erstellung der Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten (Stufe 2). 93 Seiten. Landesbetrieb für Hochwasserschutz Sachsen-Anhalt.
- MAKKONEN, L. (2006): Plotting positions in extreme value analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 334-340. DOI: 10.1175/jam2349.1.
- MERZ, B., NGUYEN, V. D. & S. VOROGUSHYN (2016): Temporal clustering of floods in Germany: Do flood-rich and flood-poor periods exist? *Journal of Hydrology*, 541, 824-838. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.07.041.
- MERZ, B., VOROGUSHYN, S., LALL, U., VIGLIONE, A. & G. BLÖSCHL (2015): Charting unknown waters – On the role of surprise in flood risk assessment and management. *Water Resources Research*, 51(8), 6399-6416. DOI: 10.1002/2015WR017464.
- PETROW, T. & A.H. THIEKEN (2015): Entwicklungen in der Flächenvorsorge. In: DKKV (2015): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe 53, Bonn, S. 92-99. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V.
- ROGGENKAMP, T. & J. HERGET (2014): Reconstructing peak discharges of historic floods in the River Ahr, Germany. *Erdkunde*, 68(1), 49-59.
- ROGGENKAMP, T. & J. HERGET (2022): Hochwasser der Ahr im Juli 2021 – Abflussabschätzung und Einordnung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 66(1), 40-49.
- SCHENDEL, T. & R. THONGWICHIAN (2017): Considering historical flood events in flood frequency analysis: Is it worth the effort? *Advances in Water Resources*, 105, 144-153. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.05.002.
- SCHMOCKER-FACKEL, P. & F. NAEF (2010): Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1581-1594. DOI: 10.5194/hess-14-1581-2010.
- SCHUMANN, A. (2005): Hochwasserstatistische Bewertung des Augusthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der Saisonalen Statistik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 49(4), 200-206.
- SCHUMANN, A. (2007): Anwendung partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente zur Berücksichtigung historischer Ereignisse in der Extremwertstatistik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 51(2), 73-81.
- VOGEL, K., ÖZTÜRK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T. et al. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61(3), 163-175. DOI: 10.5675/HyWa_2017,3_2.