WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Ermittlung von Hochwasserscheiteln und -füllen für große Jährlichkeiten

WasserWirtschaft

Fischer, Svenja; Schumann, Andreas; Winkler, Ulf

https://doi.org/10.1007/s35147-025-2455-8

This publication is made publicly available in the institutional repository of Wageningen University and Research, under the terms of article 25fa of the Dutch Copyright Act, also known as the Amendment Taverne.

Article 25fa states that the author of a short scientific work funded either wholly or partially by Dutch public funds is entitled to make that work publicly available for no consideration following a reasonable period of time after the work was first published, provided that clear reference is made to the source of the first publication of the work.

This publication is distributed using the principles as determined in the Association of Universities in the Netherlands (VSNU) 'Article 25fa implementation' project. According to these principles research outputs of researchers employed by Dutch Universities that comply with the legal requirements of Article 25fa of the Dutch Copyright Act are distributed online and free of cost or other barriers in institutional repositories. Research outputs are distributed six months after their first online publication in the original published version and with proper attribution to the source of the original publication.

You are permitted to download and use the publication for personal purposes. All rights remain with the author(s) and / or copyright owner(s) of this work. Any use of the publication or parts of it other than authorised under article 25fa of the Dutch Copyright act is prohibited. Wageningen University & Research and the author(s) of this publication shall not be held responsible or liable for any damages resulting from your (re)use of this publication.

For questions regarding the public availability of this publication please contact
openaccess.library@wur.nl

Ermittlung von Hochwasserscheiteln und -füllen für große Jährlichkeiten

Die Ermittlung von Hochwasserscheiteln für Jährlichkeiten über 200 Jahren stellt aufgrund der Unsicherheit in der Schätzung, bedingt durch kurze Beobachtungsreihen und einzelne extreme Hochwasser, eine große Herausforderung dar. Um das Potenzial extremer Hochwasser in der Schätzung zu berücksichtigen, kann die Schiefe in der Berechnung maximiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, inwieweit eine Region Potenzial für extreme Hochwasser aufweist. Zusätzlich zum Hochwasserscheitel wird zudem für die Bemessung auch die Hochwasserfülle benötigt. Diese ist jedoch abhängig vom Hochwassertyp und kann abhängig von den auslösenden Faktoren in der Atmosphäre und dem Einzugsgebiet zu unterschiedlichen Ganglinienformen und somit auch Füllen führen.

Svenja Fischer, Andreas Schumann und Ulf Winkler

1 Stand der Technik

Im DWA-Merkblatt M 552 „Stochastische Wege zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung deterministischer Aspekte“ sind verschiedene Verfahren zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten vorgestellt [2], [3]. Jedoch wird dort ebenfalls betont, dass eine uneingeschränkte Nutzung dieser Verfahren nur bis zu einer Jährlichkeit von 200 Jahren empfohlen werden kann. Im Bereich größerer Jährlichkeiten, wie sie zum Beispiel in der DIN 19 700 [1] für die Bemessungshochwasser von Talsperren vorgesehen sind, ist die Unsicherheit der Schätzung oftmals sehr groß, so dass die Anwendbarkeit einzelner Verfahren mit Hilfe hydrologischer Kenntnisse der einzelnen Pegel geprüft werden sollte.

Ein Verfahren, welches explizit für die Bestimmung von Hochwasserquantilen im Jährlichkeitsbereich über 100 Jahren entwickelt wurde, ist das Kleeberg-Schumann-Verfahren [6], [7], das auf einer einfach anzuwendenden Methodik basierend auf Momenten beruht. Jedoch hat dieses Verfahren auch Nachteile, wie zum Beispiel die Verwendung der nicht-robusten Momentenmethode, der in Deutschland mittlerweile weniger gebräuchlichen Pearson-III-Verteilung und der Berücksichtigung einer zwischenzeitlich veralteten Datenbasis, welche lediglich Hochwasser bis ca. ins Jahr 2000 beinhaltet [8].

Daher wurde ein neues Verfahren zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten großer Jährlichkeiten entwickelt [9].

Kompakt

- Hochwasserscheitel können mit Hilfe der maximierten Schiefe für große Jährlichkeiten bestimmt werden.
- Der Einfluss der beobachteten Hochwasser in einer Region sollte dabei berücksichtigt werden.
- Die zugehörige Hochwasserfülle kann unter Berücksichtigung der auslösenden Faktoren bestimmt werden.

Dieses Verfahren verwendet die L-Momente zur Parameterschätzung und basiert auf der in Deutschland und Europa vielfach verwendeten Generalisierten Extremwertverteilung (GEV). Diese Maximierung berücksichtigt jedoch die regionalen Unterschiede im Auftreten extremer Hochwasserereignisse nicht. Mit Hilfe normierter, lokal beobachteter Höchstwerte wurde eine Anpassung des Verfahrens entwickelt, die die maximierten Hochwasserwerte unter Berücksichtigung des Hochwasserregimes einer Region berücksichtigt.

In diesem Beitrag wird die Anwendung des neuen Verfahrens im Vergleich zum Kleeberg-Schumann-Verfahren für einen ausgewählten Pegel im Erzgebirge vorgestellt und der Einfluss einzelner extremer Hochwasser in der Region auf die Schätzung dargestellt. Für die Bemessung ist jedoch auch die Kenntnis der Hochwasserfülle von großer Bedeutung. Diese bestimmt, wie viel gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum in einer Stauanlage zur Retention des Hochwassers bereitgehalten werden muss. Die Hochwasserfülle ist jedoch nicht eindeutig durch den Hochwasserscheitel determiniert, sondern hängt von den hochwasserauslösenden Faktoren, wie der Intensität und der zeitlichen Verteilung des Niederschlags oder der Vorfeuchte im Einzugsgebiet, ab. So können Ganglinien mit gleichem Scheitelwert sehr unterschiedliche Formen aufweisen, wie zum Beispiel kurze steile Hochwasserganglinien bei Starkregen oder langandauernde Wellen mit großen Volumina bei Dauerregen oder Schneeschmelze. In diesem Beitrag wird eine typdifferenzierende Bestimmung der zum Hochwasserscheitel zugehörigen Fülle vorgestellt, welche die Hochwassergenese berücksichtigt und eine Szenarienbetrachtung erlaubt.

2 Bestimmung von Hochwasserscheiteln für große Jährlichkeiten

2.1 Methodik

In diesem Beitrag werden drei verschiedene Methoden angewendet, um Hochwasserscheitel für Jährlichkeiten von mehr als 200 Jahren zu bestimmen. Wie zuvor beschrieben wurde bisher häufig das Kleeberg-Schumann-Verfahren (KS-Verfahren) ange-

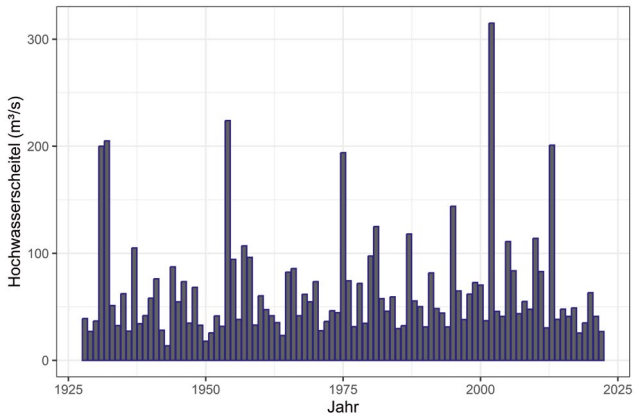

Bild 1: Jahreshöchstabflüsse am Pegel Aue 1/Schwarzwasser

wandt, welches auf einer Bestimmung der Produktmomente, der Maximierung der Schiefe auf einen Wert von 4 sowie der Anwendung der Pearson-III-Verteilung basiert [6], [7]. Um neuen Entwicklungen in der Hochwasserstatistik Rechnung zu tragen, wurden zwei neue Ansätze entwickelt, um die Schiefewerte zu maximieren bzw. die Maximierung an das Hochwasserregime anzupassen [9]: das Q-Verfahren und das QK-Verfahren.

Das Q-Verfahren schreibt das Kleeberg-Schumann-Verfahren fort. Statt der Pearson-III- Verteilung wird die GEV verwendet und die Parameterschätzung erfolgt über L-Momente. Hierzu werden die ersten beiden L-Momente L_1 und L_2 sowie die L-Schiefe $\tau_3 = \frac{L_3}{L_2}$ der Stichprobe bestimmt [5], die L-Schiefe τ_3 maximiert und anschließend die HQ(T)-Werte nach der folgenden Formel bestimmt:

$$HQ_{(T)} = l_1 + l_2 \cdot k_{100} \cdot f_{T;Q} \quad (1)$$

$$\text{wobei } k_T = \frac{\Gamma(1+\xi) - (-\ln(1-1/T))^{\xi}}{\Gamma(1+\xi)\cdot(1-2^{(-\xi)})} \quad (2)$$

$$\text{mit } \xi = 7{,}859\left(\frac{2}{3+\tau_3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}\right) + 2{,}9554\left(\frac{2}{3+\tau_3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}\right)^2 \quad (3)$$

Die Faktoren $f_{T;Q}$ ergeben sich aus dem Verhältnis von $k_{100;Q}/k_{T;Q}$ aus Gl. (2), basierend auf einem maximierten $\tau_{3;\max}$ -Wert von 0,466, der sich als 95-%-Quantil von τ_3 -Werten, abgeleitet aus 700 Beobachtungsreihen deutscher Pegel, ergab. Der Häufigkeitsfaktor $f_{10000;Q}$ ergibt sich damit zu 8,493.

Mit dem QK-Verfahren kann die Verwendung des maximierten Wertes von τ_3 in Gl. (1) an die Hochwasserverhältnisse des jeweiligen Einzugsgebietes insbesondere bei im Verhältnis zum Median großen HHQ-Werten angepasst werden [9]. Hierzu wurden die an den einzelnen Pegeln geschätzten τ_3 -Werte klassenabhängig nach dem Verhältnis des größten beobachteten Hochwassers zum Median aller Hochwasserscheitel (BHHQ) bestimmt. Je nach beobachteten Höchstwerten wird dementsprechend der verwendete τ_3 -Wert unterschiedliche maximiert. Bei einem BHHQ im Bereich von 5 bis 9 liegt der Faktor $f_{10\,000;QK}$ bei 9,31.

2.2 Berechnung am Beispiel des Pegels Aue 1/Schwarzwasser

Der Pegel Aue 1 am Schwarzwasser mit 363 km² Einzugsgebietsgröße gehört zum Mulde-Einzugsgebiet, einem Nebenfluss der Elbe, und liegt im Erzgebirge in Sachsen. Es liegen Beobachtungen zu Jahreshöchstabflüssen für den Zeitraum 1928 bis 2022 (Abflussjahr) vor (**Bild 1**). Die beiden größten Hochwasser der systematischen Reihe traten an diesem Pegel im August 2002 (315 m³/s) und im Juli 1954 (214 m³/s) auf. Weitere, ähnlich große Hochwasser wie das aus dem Jahr 1954 traten im Juli 1932 (200 m³/s), im Januar 1932 (205 m³/s), im Dezember 1974 (194 m³/s) und im Juni 2013 (201 m³/s) auf.

Zunächst wurden für diesen Pegel die Produktmomente sowie die L-Momente bestimmt (**Tabelle 1**). Wie zu sehen ist, liegen sowohl die Schiefe als auch die L-Schiefe τ_3 unterhalb der beiden für das KS-Verfahren und das Q-Verfahren angenommen maximalen Schiefen. Eine Anwendung dieser Verfahren für große Jährlichkeiten liefert somit größere Hochwasserquantile als die Berechnung allein auf Basis der Stichprobe.

Die Ergebnisse der drei Verfahren zusammen mit den aus der Stichprobe mittels GEV und L-Momenten berechneten Hochwasserquantilen sind in **Bild 2** gegeben. Es ist zu sehen, dass das KS-Verfahren deutlich kleinere Hochwasserquantile liefert. Dies ist vor allem durch den Wechsel der Verteilungsfunktion und der Momentenschätzung bedingt. Für den Pegel Aue 1 würde man mit dem KS-Verfahren beispielsweise ein HQ_{200} von 315 m³/s erhalten, was dem 2002 beobachteten Scheitel entsprechen würde. Das $HQ_{10\,000}$ wäre im Vergleich dann nicht einmal doppelt so groß.

Die drei übrigen Verfahren liefern deutlich größere Hochwasserquantile. So liegt z. B. das aus der Stichprobe direkt erhaltene $HQ_{10\,000}$ bei 1 620 m³/s, also einem Vielfachen des beobachteten HHQ. Dieses ist jedoch mit großer Unsicherheit behaftet, da eine Reihenlänge von rund 100 Jahren nicht für eine solche Extrapolation des Quantilbereichs geeignet ist. Verwendet man die maximierte L-Schiefe im Q-Verfahren, so erhöht sich das $HQ_{10\,000}$ auf 1 953 m³/s. Diese vergleichsweise geringe Erhöhung liegt darin begründet, dass die beobachtete L-Schiefe von 0,429 bereits nah an der maximierten L-Schiefe von 0,466 liegt und somit dieser Pegel deutschlandweit schon eine der größten Schiefen aufweist. Beim QK-Verfahren wird noch zusätzlich berücksichtigt, wie sich die größten beiden Hochwasser zum Median aller Hochwasser verhalten. Entsprechend der Einordnung der beiden größten Hochwasser erhöht sich der zur Extrapolation verwendete τ_3 -Wert auf 0,485 und es ergibt sich ein $HQ_{10\,000}$ = 2 135 m³/s.

Es wird ersichtlich, dass insbesondere die Höchstwerte einen großen Einfluss auf die Schätzung haben. Dabei werden diese in den Verfahren auf unterschiedliche Weise berücksichtigt: Beim

Tabelle 1: Produktmomente und L-Momente für die Jahreshöchstabflüsse am Pegel Aue 1/Schwarzwasser (Quelle: Fischer)

Mittelwert	Median	Standardabweichung	Schiefe C_S	L_1	L_2	τ_3
65,30	47,80	49,82	2,56	65,30	22,85	0,429

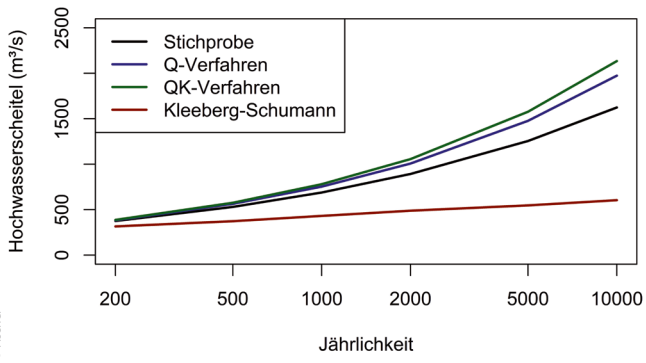

Bild 2: Hochwasserquantile großer Jährlichkeit bestimmt mittels vier verschiedener Verfahren am Pegel Aue 1/Schwarzwasser

KS- und Q-Verfahren gehen extreme Hochwasser nur indirekt in die Schätzung der Momente ein, während sie beim MR-Verfahren direkt zur Berechnung der Schiefe herangezogen werden und somit den regionalen Einfluss darstellen.

Im Folgenden soll dieser Einfluss extremer Hochwasser genauer untersucht werden. Dazu werden die beiden großen Hochwasser aus den Jahren 2002 und 2013 aus der Stichprobe entfernt und obige Verfahren noch einmal angewendet. Das Entfernen der beiden Hochwasser führt zu einer deutlichen Verringerung der Schiefe auf 2,16. Dies spiegelt sich auch im $HQ_{10\,000}$ ermittelt mittels des KS-Verfahrens wider, welches sich zu 479 m³/s ergibt (Verringerung um 20 %). Auch das $HQ_{10\,000}$ aus dem Q-Verfahren verringert sich in ähnlichem Umfang auf 1 550 m³/s.

Nur das MRD-Verfahren liefert ein deutlich geringeres $HQ_{10\,000}$ als zuvor mit 977 m³/s (Verringerung um 54 %), was vor allem darin begründet ist, dass das nun größte Hochwasser der Stichprobe (im Jahr 1954) sich nicht mehr so stark vom Median unterscheidet (4,6-fache) und das BHHQ somit in einer anderen Klasse liegt. Das QK-Verfahren berücksichtigt hier folglich das Potenzial extremer Hochwasser. Gleichzeitig kann das QK-Verfahren auch genutzt werden, um das Potenzial extremer Hochwasser einer Region zu berücksichtigen, in dem man z. B. das Verhältnis der größten Hochwasser zum Median vom Nachbarpegel überträgt, wenn am untersuchten Pegel solch ein Extremhochwasser nicht aufgezeichnet wurde.

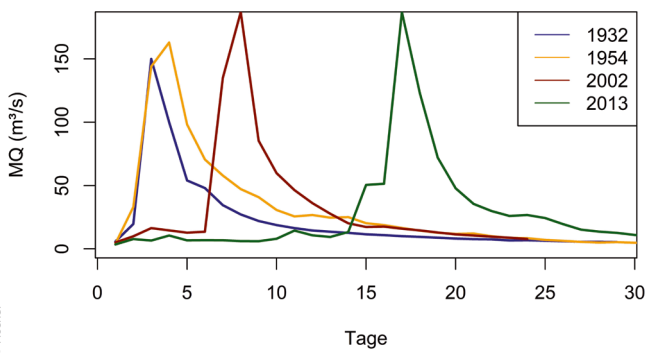

Bild 3: Hochwasserfüllen (auf Basis von mittleren täglichen Abflüssen) für die Hochwasser der Jahre 1932 (42 Mio. m³), 1954 (73 Mio. m³), 2002 (51 Mio. m³) und 2013 (53 Mio. m³) am Pegel Aue 1/Schwarzwasser

3 Bestimmung der zum Scheitel zugehörigen Hochwasserfülle unter Berücksichtigung der Hochwassergenese

Wie bereits oben beschrieben, weisen die größten Hochwasser am Pegel Aue 1 (abgesehen vom Hochwasser 2002) Scheitel im Bereich von 200 m³/s auf. Jedoch sind diese Ereignisse keinesfalls gleich: nicht nur, dass sie in verschiedenen Jahreszeiten auftraten, auch ihre Füllen sind sehr unterschiedlich (**Bild 3**). So weisen die Hochwasser 2002 und 2013 kleinere Hochwasser im Vorlauf der eigentlichen Hochwasser auf, ausgelöst durch vorhergehende Niederschläge. Das Beispiel zeigt, dass selbst für ein und denselben Scheitel nicht dieselbe Hochwasserfülle angenommen werden kann. Stattdessen ist die Ganglinienform zu berücksichtigen, welche wiederum von den hochwasserauslösenden Faktoren wie Niederschlag und Vorfeuchte abhängt. So sind beispielsweise bei intensiven Starkregenereignissen eher Hochwasser mit steiler Ganglinienform und geringem Volumen zu erwarten, wohingegen Dauerregen langsame Anstiege des Abflusses, einen langsamen Anstieg der Vorfeuchte und häufig große Volumina bedingt. Um diese Unterschiede in der Fülle zu berücksichtigen, ist es notwendig, die Hochwasser anhand ihrer Genese zu klassifizieren.

3.1 Hochwasserklassifikation

In diesem Beitrag wird eine Hochwasserklassifikation verwendet, welche auf der Relation von Fülle zu Scheitel basiert. Dies hat den Vorteil, dass neben täglichen Abflussdaten lediglich Informationen zu Niederschlag und Schneeschmelze vorliegen müssen [4]. Regenhochwasser, d. h. Hochwasser mit einem Anteil der Schneeschmelze von weniger als 20 %, werden anhand der Hochwasserzeitskale (dem Verhältnis von Hochwasserfülle zu -scheitel) in drei Typen unterteilt: R1 (Starkregenhochwasser), R2 (Dauerregenhochwasser) und R3 (Regensequenzhochwasser). Zudem werden anhand des Verhältnisses von Schneeschmelze zu Niederschlag noch zwei weitere Schneehochwassertypen definiert: S1 (Regen-auf-Schnee-Hochwasser) und S2 (Schneeschmelzhochwasser). Für den Pegel Aue 1 wurden für den Zeitraum von 1928 bis 2022 225 Hochwasserereignisse identifiziert, 27 % davon vom Typ R1, 25 % R2, 15 % R3, 20 % S1 und 13 % S2.

3.2 Berechnung der Hochwasserfülle

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, ist jeder Hochwassertyp durch ein spezifisches Verhältnis von Scheitel und Fülle gekennzeichnet (**Bild 4a**); ein Vorteil der Klassifikation, der bei der Schätzung von Hochwasserfüllen für Hochwasserquantile genutzt werden kann. Die Wahrscheinlichkeit eines jeden Hochwassertyps für extreme Quantile kann dabei empirisch aus der Häufigkeit extremer Hochwasser in der Stichprobe abgeleitet werden. Für das $HQ_{10\,000}$ = 2 135 m³/s berechnet mit dem QK-Verfahren ergeben sich somit die folgenden Szenarien, abhängig vom Hochwassertyp:

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 60 % tritt ein solcher Hochwasserscheitel in Folge eines Starkregenhochwassers (R1) auf, welches eine Fülle von rund 188 Mio. m³ hätte. Die Wahrscheinlichkeit eines derart hohen Hochwassers im Ergebnis eines Dauerregens (R2) ist 40 %: die Fülle wären dann mehr als doppelt so

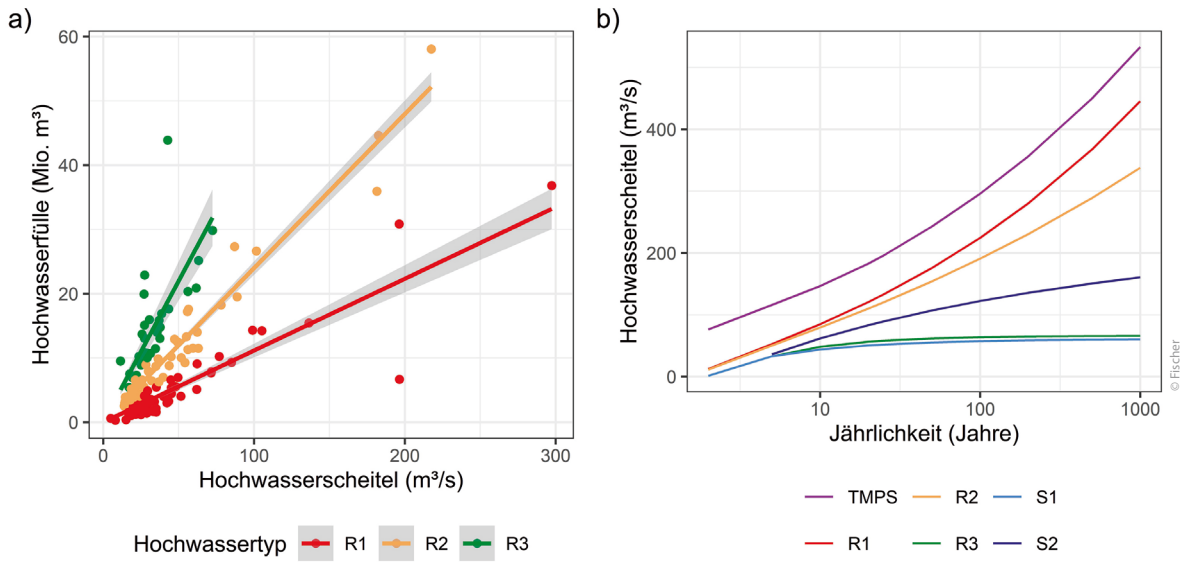

Bild 4: a) Hochwasserscheitel- und -füllen-Verhältnis für verschiedene Hochwassertypen; b) Verteilungsfunktionen für verschiedene Hochwassertypen und Mischungsmodell TMPS

hoch wie im ersten Fall (440 Mio. m³), die Hochwasserganglinie weniger steil und zeitlich länger. Die übrigen drei Hochwassertypen würden einen solchen Scheitel voraussichtlich nicht produzieren, da die erforderliche Intensität des Direktabflusses nicht gegeben ist. Dies ist bereits in den jeweiligen Verteilungsfunktionen erkennbar (**Bild 4b**), da die Verteilungsfunktionen der Hochwassertypen R3, S1 und S2 einem oberen Limit entgegenstreben. Die Hochwassertypen R1 und R2 jedoch zeigen klares Potenzial für große Hochwasserscheitel.

Autoren

Dr. rer. nat. habil. Svenja Fischer
Wageningen University & Research
Droevendaalsesteeg 3
6708 PB, Wageningen, Niederlande
svenja.fischer@wur.nl

Prof. Dr. Andreas Schumann
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
andreas.schumann@ruhr-uni-bochum.de

Ulf Winkler
Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
Bahnhofstraße 14
01796 Pirna
ulf.winkler@ltv.sachsen.de

Literatur

[1] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 19 700 Stauanlagen - Teile 10-15. Berlin: Beuth-Verlag, 2004/2019.
[2] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. In: DWA-Merkblätter (2012), M 552.
[3] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): Stochastische Wege zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung deterministischer Aspekte. In: DWA-Merkblätter (2024), M 552.
[4] Fischer, S.; Schumann, A.: Type-Based Flood Statistics. Cham: Springer Nature, 2024.
[5] Hosking, J. R. M.: L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. In: Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 52 (1990), Nr. 1, S. 105-124.
[6] Kleeberg, H.-B.; Schumann, A. H.: Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. In: WasserWirtschaft 91 (2001), Heft 2, S. 90-95.
[7] Kleeberg, H.-B.; Schumann, A. H.: Zur Ableitung von Bemessungsabflüssen geringer Überschreitungswahrscheinlichkeiten. In: WasserWirtschaft 91 (2001), Heft 12, S. 609.
[8] Schumann, A.; Fischer, S.: Sind Bemessungsabflüssen nach dem Kleeberg/Schumann-Verfahren noch begründet? In: WasserWirtschaft 113 (2023), Heft 10, S. 10.
[9] Schumann, A.; Fischer, S.; Winkler, U.: Neue Ansätze zur Ableitung von Hochwasserabflüssen großer Jährlichkeiten. In: WasserWirtschaft 115 (2025), Heft 4.

DOI dieses Beitrags: http://doi.org/10.1007/s35147-025-2455-8

Svenja Fischer, Andreas Schumann and Ulf Winkler

Determination of flood peaks and flood levels for large annual periods

The determination of flood peaks for annual periods of more than 200 years is a major challenge due to the uncertainty in the estimation caused by short observation series and individual extreme floods. In order to take the potential of extreme floods into account in the estimate, the skewness in the calculation can be maximised. The extent to which a region has the potential for extreme flooding must be taken into account. In addition to the flood crest, the flood depth is also required for the assessment. However, this depends on the type of flood and can lead to different hydrograph shapes and therefore also to different flood levels depending on the triggering factors in the atmosphere and the catchment area.