

# Innovatives Bemessungsverfahren für Stauanlagen unter Anwendung von Johnson-Verteilungen

Das Hochwasser im Juli 2021 zeigt die Notwendigkeit robuster Bemessungsverfahren. Das daraufhin entwickelte Hüllkurvenverfahren baut auf bewährten Ansätzen auf und integriert hydrologisches Wissen in Form einer Abflussobergrenze. Dabei kommt die Johnson-Verteilung zum Einsatz, die sich aufgrund ihrer Flexibilität einer solchen Obergrenze annähern kann. Das entwickelte Verfahren ist in der Lage, eine höhere Robustheit gegenüber Extremwerten, verglichen mit herkömmlichen Methoden, zu gewährleisten.

Hubert Lohr, Isabelle Huber, Gerd Demny, Daniel Bittner und Sandra Richter

## 1 Veranlassung

Das Hochwasserereignis im Juli 2021 war extrem sowohl in Bezug auf Abflussvolumina als auch Abflussspitzen, die teilweise noch nie dagewesene Dimensionen annahmen. Betroffen waren vor allem die Wasserverbände Wupperverband, Erftverband und der Wasserverband Eifel-Rur. Im Nachgang des Ereignisses beauftragten die Verbände Sydro Consult GmbH, um die Einordnung des Ereignisses im Kontext bisheriger Festlegungen zu Bemessungshochwasserereignissen zu untersuchen.

Die bisher verwendeten Verfahren zur Einordnung von Extremereignissen gemäß DWA-Merkblatt M 552 benutzen Verteilungsfunktionen, die nach oben hin unbegrenzt sind [1]. Wenn neue, extreme Ereignisse der Stichprobe hinzugefügt werden, zeigen diese Verteilungsfunktionen häufig ein unplausibles Verhalten, in dem schon bei relativ geringen Jährlichkeiten physikalisch nicht nachvollziehbare Abflüsse erzeugt werden (**Bild 1**). Dieses Problem ist der Tatsache geschuldet, dass keine weiteren hydrologischen Randbedingungen in den Berechnungsansatz einfließen. Angesichts dieser Problematik kann es sinnvoll sein, eine maximale Obergrenze für Abflüsse bzw. Abflussspenden als zusätzliche hydrologische Information einzuführen. Ziel der Entwicklung einer neuartigen Methode ist es, eine höhere Robustheit gegenüber Extremereignissen zu erzielen.

## 2 Methodik

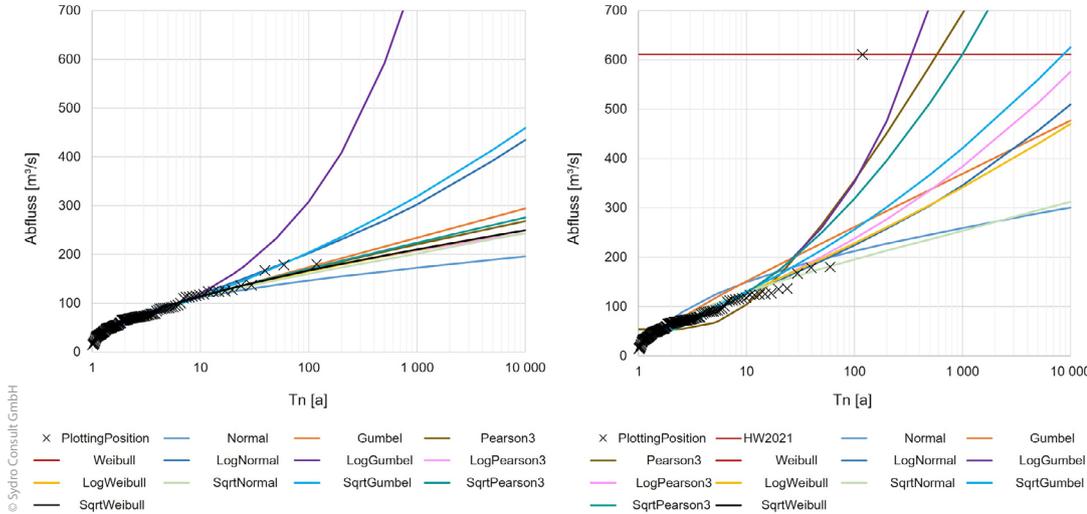
### 2.1 Hüllkurvenverfahren

Um eine solche Obergrenze zu ermitteln, wurde das Hüllkurvenverfahren angewandt. Dieses wurde unter anderem von Francou-Roudier über die Analyse von weltweit aufgetretenen Hochwasserereignissen abgeleitet und anschließend in verschiedenen Variationen weiterentwickelt [2], [3]. So gibt es z. B. Hüllkurven für verschiedene geographische Regionen, unter anderem auch für Europa, den Mittelmeerraum etc. Um eine für

Deutschland gültige Hüllkurve abzuleiten, wurden 300 Hochwasserereignisse in Deutschland aus den Jahren 1993 bis 2021 auf Basis von Literaturangaben zusammengetragen und ausgewertet (Kreise, **Bild 2**). Die beobachteten Ereignisse wurden um berechnete Ereignisse aus einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung zur Ableitung maximaler Abflusswerte ergänzt (Dreiecke, **Bild 2**). Die Berechnung der Maximalereignisse erfolgte einerseits durch Sydro Consult mit der Software Talsim-NG unter Anwendung maximierter Gebietsniederschläge für die Talsperren des Wupperverbands sowie der Wassergewinnungs- und -aufbereitungsgesellschaft Nordeifel (WAG) als auch durch die Landestalsperrenverwaltung des Freistaats Sachsen (LTV). Die maximierten Gebietsniederschläge wurden gemäß der DVWK-Mitteilung „Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland“ angesetzt [4]. Die berechneten Maximalereignisse sind auch als solche zu verstehen, da eine Maximierung der Parameter im Rahmen des physikalisch Möglichen erfolgte. Somit stellen die Abflusswerte eine physikalische Obergrenze dar, die sich aus der ungünstigsten Kombination von Klima- und Anfangsbedingungen (z. B. Bodenfeuchte und Niederschlagsverteilung) ergibt, und können daher als „Probable Maximum Flood“ (PMF) interpretiert werden. Im Abgleich mit bestehenden Hüllkurven für bestimmte geographische Regionen, z. B. einer Europa-Hüllkurve und der Hüllkurve nach Francou-Rodier, wurde daraufhin eine spezifische Hüllkurve für Deutschland ermittelt, welche die beschriebenen Datenpunkte umfasst

### Kompakt

- Das entwickelte Verfahren baut auf bewährten Ansätzen auf und integriert hydrologisches Wissen in Form einer Abflussobergrenze.
- Das Verfahren wurde an über 15 Standorten erfolgreich eingesetzt.
- Durch die gesteigerte Robustheit stellt das Verfahren einen Baustein in der Klimawandelanpassung dar.



**Bild 1:** Einfluss von einzelnen Extremereignissen auf die Verteilungsfunktionen (links ohne Berücksichtigung des Hochwassers 2021, rechts mit Berücksichtigung des Hochwassers 2021)

(Bild 2). Die resultierende Hüllkurve aus allen Ereignissen fungiert als „hydrologisches Gedächtnis“ und ermöglicht die Abschätzung von Maximalabflüssen für verschiedene Einzugsgebietsgrößen. Eine Unterscheidung in Regionen (Flachland, Alpen etc.) ist möglich, wenn bei ausreichender Anzahl an Datenpunkten die Kurven getrennt ausgewertet werden.

### 2.2 Bestimmung von Johnson-Funktionen in der Extremwertstatistik

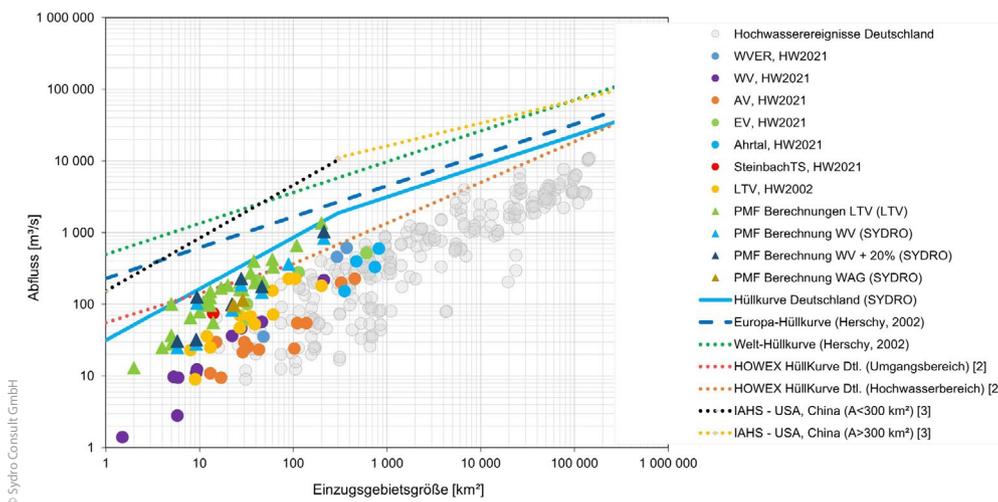
Die in der Hochwasserstatistik üblicherweise vertretenen Verteilungsfunktionen besitzen keine Obergrenze und lassen sich deshalb nicht mit einer Hüllkurve erfassen. Aufgrund ihrer Flexibilität und der Möglichkeit verschiedene Formen abzubilden, kann jedoch die Johnson-Verteilungsfunktion in eine Hüllkurve eingepasst und so in die Extremwertstatistik integriert werden. Diese wird durch Form-, Skalierungs- und Lageparameter bestimmt [5], [6].

Die bisher angewendeten Verteilungsfunktionen haben sich insbesondere in niedrigen Jährlichkeiten (bis 100 Jahre) als zuverlässig erwiesen und liefern in diesem Bereich plausible Werte. Diese Erkenntnis dient als Grundlage für die Weiterent-

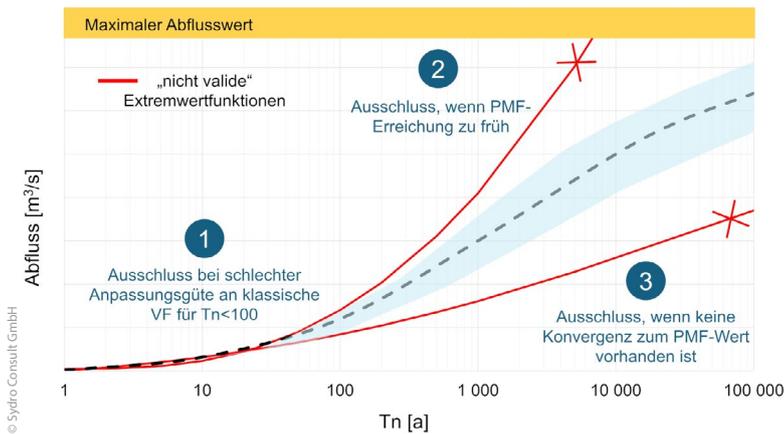
wicklung des Verfahrens, welches auf den herkömmlichen Verteilungsfunktionen aufbaut und zusätzlich die Johnson-Funktion als wesentlichen Bestandteil einbezieht. Die Generierung der Johnson-Funktionen in der Extremwertstatistik erfolgt daher anhand von zwei zentralen Bedingungen:

- Der Verlauf einer Johnson-Funktion soll sich bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren dem einer der herkömmlichen theoretischen Verteilungsfunktion annähern (z. B. Normal, Gumbel, Pearson3 etc.).
- In den oberen Jährlichkeiten soll die Johnson-Funktion gegen einen Maximalwert konvergieren, der als PMF interpretiert werden kann.

Dazwischen existiert ein Übergangsbereich, dessen Verlauf sich durch die beiden genannten Bedingungen ergibt. Die Generierung einer Johnson-Funktion kann dabei einem Optimierungsproblem gleichgesetzt werden. Die Zielfunktion entspricht der Minimierung der summierten und gewichteten Abweichungen zwischen der Johnson-Funktion und der ihr zugrundeliegenden herkömmlichen Verteilungsfunktion bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren sowie der Konvergenz zum Maximalwert. Die Gewichtung der



**Bild 2:** Resultierende Hüllkurve für Deutschland (hellblau) auf Basis beobachteter Extremereignisse und berechneter Maximalwerte



**Bild 3:** Gütekriterien zur Auswahl eines Johnson-Korridors

Abweichungen basiert auf der Annahme, dass besser gesichertem Wissen (niedrigere Jährlichkeiten) eine höhere Bedeutung eingeräumt werden soll als unsicherem Wissen (höhere Jährlichkeiten). Daher werden die Abweichungen entsprechend der Jährlichkeit ( $1/T_n$ ) gewichtet, wobei  $HQ_2$  eine Gewichtung von 0,5,  $HQ_{10}$  eine Gewichtung von 0,1 usw. besitzt. Die Form- und Lageparameter werden durch ein iteratives Verfahren so lange angepasst, bis eine gültige und optimale Lösung gefunden wird. Der Skalierungsparameter wird gleich dem Maximalwert gesetzt und kann im Zuge der Iterationen nicht verändert werden.

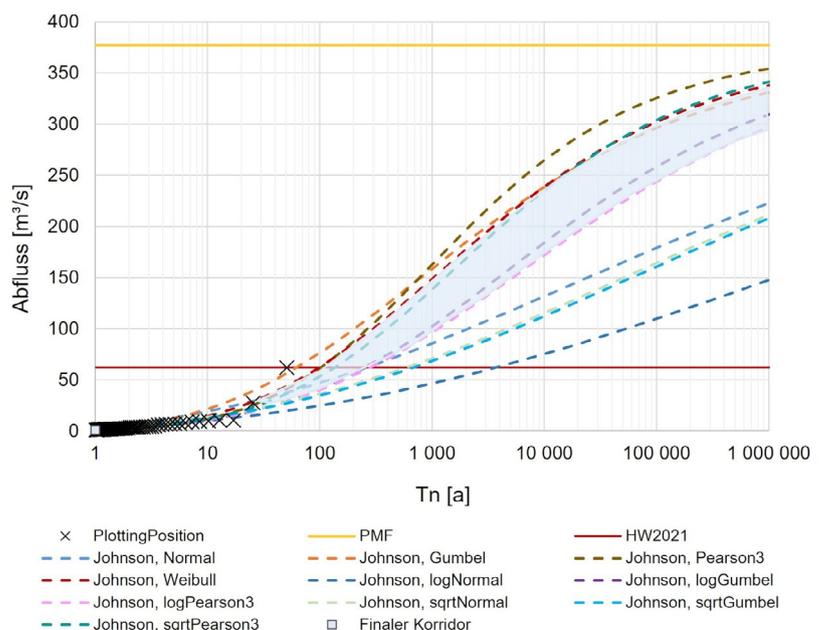
### 2.3 Anwendung von Gütekriterien zur Auswahl eines Johnson-Korridors

Für jede der herkömmlichen Verteilungsfunktionen wird gemäß dem beschriebenen Verfahren eine entsprechende Johnson-Funktion gebildet. Dies führt zu einer Vielzahl von Johnson-Funktionen, abhängig davon, wie viele herkömmliche Funktionen und Schätzmethoden in das Verfahren eingehen. Um einen plausiblen Korridor aus diesen Funktionen auszuwählen, wurden verschiedene Gütekriterien entwickelt, validiert und in das Verfahren integriert: Einerseits muss sich die Johnson-Funktion im Bereich von Jährlichkeiten kleiner 100 Jahren ausreichend gut an die ihr zugrundeliegende herkömmliche Verteilungsfunktion anpassen. Zudem muss eine Konvergenz gegen die Obergrenze vorhanden sein. Zu flach verlaufende Johnson-Funktionen sind als ungültig zu betrachten. Gleichzeitig darf keine unplausibel frühe Erreichung des Maximalwerts auftreten (**Bild 3**). Die Anwendung dieser Kriterien resultiert in einem finalen Johnson-Korridor, der anschließend für die Ableitung von Bemessungsabflüssen  $BHQ_1$  und  $BHQ_2$  sowie auch im Rahmen einer Hochwassermerkmalsimulation zur Ableitung weitergehender Informationen genutzt werden kann. Das Vorgehen hierzu ist im Merkblatt 46 „Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19 700 in Nordrhein-Westfalen“ [7] beschrieben.

### 3 Anwendung in der Praxis

Das Verfahren wurde an Pegeln und Talsperren des Wasserverbands Eifel-Rur, des Wupperverbands, des Erftverbands, der WAG, der e-Regio sowie der LTV Sachsen angewendet und hat sich an allen untersuchten Standorten als praxistauglich erwiesen. Beispielfähig sind das Vorgehen und die Ergebnisse des Verfahrens für den Pegel Möschemer Mühle im Erft-Einzugsgebiet im Folgenden genauer beschrieben. Die Größe des Einzugsgebiets beträgt  $32 \text{ km}^2$ , der Spitzenabfluss während des Hochwasserereignisses 2021 wurde dort mit  $63 \text{ m}^3/\text{s}$  abgeschätzt. Das Ergebnis des Johnson-Verfahrens in Form eines Korridors (hellblau markiert) ist in **Bild 4** dargestellt. Zur Anwendung des Johnson-Verfahrens am Pegel Möschemer Mühle wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

- **Schritt 1: Standardanalyse zur Extremverteilung** (Auswertung von  $HQ_x$ -Verteilungen)  
Mit Hilfe von Messwerten wurden die gängigen Verteilungsfunktionen geschätzt. Die Werte bis zum  $HQ_{100}$  sind von Bedeutung, da die Johnson-Verteilung in einem der nächsten Schritte an die Standardverteilungen angenähert wird.
- **Schritt 2: Ableitung eines Maximalwerts aus der Hüllkurve**  
Mit einer Einzugsgebietsgröße von  $32 \text{ km}^2$  ergibt sich aus der Hüllkurve (**Bild 2**) ein Maximalwert von  $377 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dieser Wert fließt in die Extremwertstatistik als theoretisch maximal mögliche Obergrenze ein und darf nicht als Bemessungswert interpretiert werden.
- **Schritt 3: Bestimmung der Johnson-Verteilungen**  
Auf Basis der herkömmlichen Verteilungsfunktionen und unter Berücksichtigung der Obergrenze wurden die Johnson-Funktionen gebildet (Vorgehen siehe Abschnitt 2.2).



**Bild 4:** Ergebnis des Johnson-Verfahrens für den Pegel Möschemer Mühle im Erft Einzugsgebiet, finaler Korridor in blau hinterlegt

#### ▪ Schritt 4: Auswahl eines Johnson-Korridors

Anhand der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Gütekriterien wurde ein finaler Korridor ausgewählt (blau hinterlegt, **Bild 4**). Das Johnson-Verfahren liefert für den Pegel plausible Ergebnisse, die zwar weiterhin auf Extremwerte wie das Ereignis 2021 reagieren, im Vergleich mit den klassischen Verteilungsfunktionen jedoch robuster sind. Dieses Verhalten lässt sich auch an den weiteren untersuchten Stauanlagen und Pegeln beobachten. Aufgrund der höheren Robustheit des Verfahrens gegenüber Extremwerten können so Änderungen in den Bemessungswerten durch neue Extremereignisse geringer gehalten werden.

## 4 Fazit und Ausblick

Das entwickelte Hüllkurvenverfahren baut auf bewährten Ansätzen auf, wobei sicheres Wissen (häufige Hochwasserereignisse) eine höhere Gewichtung erhält als unsicheres Wissen (seltene und extreme Ereignisse). Die Einführung einer nach oben begrenzten und auf einen Maximalwert konvergierenden Verteilungsfunktion, hier die Johnson-Verteilung, integriert zusätzliches hydrologisches Wissen. Dadurch ist das Verfahren in der Lage, eine höhere Robustheit gegenüber Extremwerten im Vergleich zu herkömmlichen Methoden zu gewährleisten.

Das Verfahren wurde in Nordrhein-Westfalen und Sachsen bei den Verbänden und Betreibern an über 15 Standorten bereits mit Erfolg eingesetzt. Dabei hat sich unter anderem gezeigt, dass auch ohne das Ereignis 2021 in der Regel schon höhere Werte für seltene Hochwasserereignisse zu Tage kommen. Die höhere Robustheit ist nicht nur für die Findung von Bemessungswerten für Stauanlagen von Vorteil, sondern hat auch Vorteile für die Ermittlung von stabilen Eingangswerten für Hochwassergefahrenkarten, um ein weiteres Beispiel zu nennen. Insofern ist dieses Verfahren ein relevanter Baustein in der Klimawandelanpassung.

Die Robustheit des Verfahrens kann weiter gesteigert werden, je mehr Datenpunkte – sowohl berechnete als auch beobachtete – in die Analyse einfließen. Dies unterstreicht die Bedeutung einer umfassenden Datenerhebung und -nutzung. Gleichzeitig

Hubert Lohr, Isabelle Huber, Gerd Demny, Daniel Bittner und Sandra Richter

#### **Innovative design method for reservoirs using Johnson distributions**

The extreme flood event of July 2021 highlighted the need for robust reservoir design methodologies. In response, a new envelope curve technique was developed, integrating proven approaches with hydrological expertise through incorporating maximum discharge thresholds. The method employs the Johnson distribution, which, due to its flexibility, is capable of converging towards extreme values. This innovative approach enhances robustness against extreme flood events compared to conventional methods.

bieten sich durch die Weiterentwicklung der Gütekriterien zusätzliche Möglichkeiten, die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens zu optimieren. Die hohe Nachfrage aus der Praxis verdeutlicht, dass das Verfahren auf breite Akzeptanz stößt und konkrete Anwendungsbedarfe adressiert. Ein geplantes Vorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen soll in diesem Kontext weitere Impulse geben und die praktische Relevanz des Verfahrens weiter stärken.

### Autoren

**Dr.-Ing. Hubert Lohr**  
**Isabelle Huber, M. Sc.**  
**Dr.-Ing. Sandra Richter**  
 Sydro Consult GmbH  
 Mathildenplatz 8  
 64283 Darmstadt  
 h.lohr@sydro.de  
 i.huber@sydro.de  
 s.richter@sydro.de

**Dr.-Ing. Gerd Demny**  
 Wasserverband Eifel-Rur  
 Eisenbahnstraße 5  
 52353 Düren  
 gerd.demny@wver.de

**Dr.-Ing. Daniel Bittner**  
 Erftverband  
 Am Erftverband 6  
 50126 Bergheim  
 daniel.bittner@erftverband.de

### Literatur

- [1] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. In: DWA-Merkblätter (2012), M 552.
- [2] Klein, B.; Schumann, A. H.; Pahlow, M.: Extreme Hochwasser an deutschen Talsperren. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (2006), Heft 4. S. 162-168.
- [3] Herschy, R. W.: The world's maximum observed floods. In: Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002), Heft 5-6, S. 231-235.
- [4] DVWK (Hrsg.): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. In: DVWK-Mitteilungen (1997), Heft 29.
- [5] Johnson, N. L.: Systems of frequency curves generated by methods of translation. In: Biometrika 36 (1949), Heft 1/2, S. 149-176. (doi.org/10.2307/2332539).
- [6] George, F.; Ramachandran, K. M.: Estimation of Parameters of Johnson's System of Distributions. In: Journal of Modern Applied Statistical Methods 10 (2011), Heft 2. S. 494-504. (doi.org/10.22237/jmasm/1320120480).
- [7] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Merkblatt-Band 46. Düsseldorf, 2004.

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-025-2457-6>