

Andreas Schumann, Bastian Klein, Markus Schulte und Uwe Petry

# Sicherheit und Restrisiko – Ermittlung vielfältiger hydrologischer Lastfälle für Talsperren

Mit der in der DIN 19 700 zugelassenen Berücksichtigung der Retention werden neben dem Hochwasserscheitel auch Form und Fülle der Hochwasserganglinie zur Charakterisierung der hydrologischen Belastung benötigt. Da sich die Angaben zum statistischen Wiederkehrintervall einer Welle nur auf den Scheitel beziehen, müssen zusätzliche Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden. Eine Möglichkeit hierzu bieten bivariate Verteilungen, die durch Copula-Funktionen beschrieben werden können.

## 1 Einleitung

Mit der 2004 eingeführten Fassung der DIN 19 700 [1] wurde für die Hochwasserbemessungsfälle die Berücksichtigung der Retention zugelassen. Die Retentionswirkung einer Talsperre und der resultierende maximale Inhalt werden von der Form und Fülle der Ganglinie bestimmt. Damit ergibt sich das Problem der Ermittlung und statistischen Einordnung kritischer Hochwasserereignisse. Die Jährlichkeit eines Hochwassers bezeichnet nur die Überschreitungswahrscheinlichkeit des Scheitelabflusses, besagt aber nichts über die Wahrscheinlichkeiten einer bestimmten Ganglinienform oder der Hochwasserfülle. Es kann der Fall eintreten, dass eine kritische Belastung durch ein Hochwasser mit einer größeren Überschreitungswahrscheinlichkeit hervorgerufen wird als in der DIN 19 700 [1] für  $BHQ_1$  oder  $BHQ_2$  festge-

legt ist. In der DIN wird deshalb gefordert, auch die Auswirkungen von Hochwasserereignissen mit kleineren Scheitelwerten, aber Ganglinienformen, die unter Berücksichtigung der anlagenspezifischen Retentionsbedingungen eine Stauinhaltsmaximierung bewirken, zu prüfen. Es stellt sich die Frage, wie die damit zu beachtende Vielfalt hydrologischer Belastungen ermittelt werden kann. Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Weg hierzu aufgezeigt, der auf einer Erweiterung der stochastischen Hochwassermerkmalssimulationen beruht. Die Darstellungen gliedern sich in zwei Teile:

- die stochastische Generierung von Ganglinien zur Identifikation kritischer Ereignisse unter besonderer Berücksichtigung mehrgipfliger Ganglinien und
- die Einbeziehung bivariater Verteilungen zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen der Hochwasserereignisse.

## 2 Stochastische Generierung von Ganglinien über Hochwassermerkmalssimulation

Hochwassermerkmalssimulationen werden seit einigen Jahren zur Talsperrenbemessung angewendet [2]. Es gibt verschiedene Ansätze hierzu, die sich im Prinzip wenig voneinander unterscheiden. Eine Hochwasserganglinie wird durch eine analytische Funktion, z. B. durch die Gamma-Verteilung, mit Hilfe eines oder mehrerer Parameter beschrieben. Diese Parameter, z. B. Hochwasserscheitel, Scheitelanstiegszeit und Formparameter, werden bei der Generierung stochastisch variiert. Die statistischen Verteilungen der Parameter werden aus gemessenen Zeitreihen ermittelt. In Hinblick auf die Inhaltsmaximierung sind besonders mehrgipflige Ganglinien zu berücksichtigen, die durch die zeitliche Verteilung des Niederschlages oder durch die Überlagerung von Abflüssen aus Teil-einzugsgebieten mit deutlich unterschiedlichen Abflusskonzentrationszeiten bedingt sein können. Mehrgipflige Ganglinien können durch die Überlagerung [3] oder Verschneidung [4] mehrerer eingipfliger Ganglinien beschrieben werden. Nachfolgend wird nur der Ansatz der Generierung zweigipfliger Ganglinien über die Verschneidung von zwei eingipfligen Ganglinien betrachtet (Bild 1), der den Vorteil hat, dass der Scheitelwert der höheren Einzelwelle auch dem der zweigipfligen Ganglinie entspricht. Als Parameter für die stochastische Generierung der Ganglinien sind die relative Lage des grö-

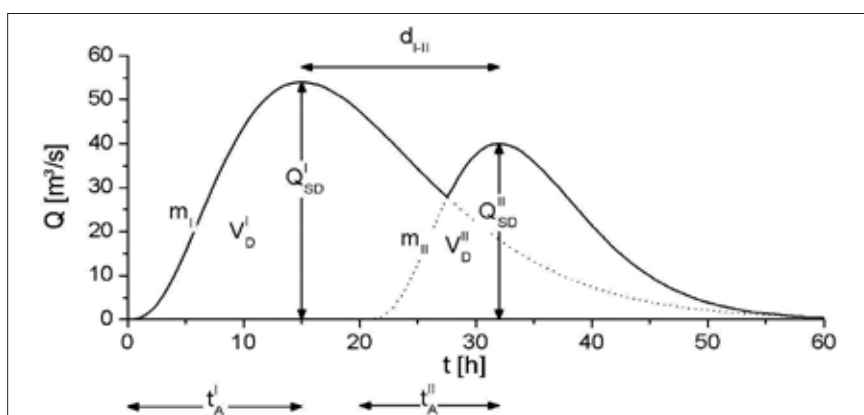


Bild 1: Beschreibung einer zweigipfligen Ganglinie durch zwei Gammaverteilungen [4]

ßeren Scheitels (an erster oder zweiter Position), der zeitliche Abstand der beiden Scheitel, die Größe der Scheitelabflüsse, die Anstiegszeiten und die Füllen der beiden zu überlagernden Wellen erforderlich. Die Formbeiwerte  $m$  können aus den anderen Parametern abgeleitet werden.

Bei der Generierung der Parameter sollten die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Kenngrößen der Hochwasserwellen, d. h. zwischen den generierten Parametern der Ganglinien Scheitel und Fülle bzw. Fülle und Scheitelanstiegszeit berücksichtigt werden. Dies kann über bivariate Wahrscheinlichkeiten erfolgen.

### 3 Kennzeichnung von Bemessungsganglinien mit bivariaten Wahrscheinlichkeiten

Zwischen dem Scheitelabfluss und der Fülle eines Hochwassers besteht ein statistischer Zusammenhang. Im Allgemeinen nimmt die Fülle eines Hochwasserereignisses mit dem Scheitelabfluss zu. Je nach Hochwasser verursachenden Niederschlägen kann allerdings ein großer Scheitelabfluss auch mit einer kleinen Fülle, z. B. infolge eines konvektiven Niederschlages in Form einer Gewitterzelle, auftreten oder aber ein mittlerer Abfluss tritt mit einem Ereignis großer Fülle, z. B. infolge von Schneeschmelze, auf. Eine Berücksichtigung dieses statistischen Zusammenhangs mit Hilfe von bivariaten Verteilungen [5] stieß in der Vergangenheit auf das Problem, dass nur eine begrenzte Zahl von Verteilungsfunktionen bivariat beschrieben werden konnte und zudem die beiden zu verknüpfenden Zufallsvariablen jeweils der gleichen Verteilungsfunktion

unterliegen mussten. Durch die Einführung eines neuen bivariaten statistischen Modells, durch die Copula-Funktionen, wird es möglich, nunmehr auch statistisch voneinander abhängige Zufallsvariable, die unterschiedlichen Verteilungsfunktionen unterliegen, zu verknüpfen. Über die Copula-Funktion  $C$  wird die Abhängigkeit zwischen den beiden Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  unabhängig von den univariaten Randverteilungen beschrieben. Die bivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt sich dann zu:

$$F_{x,y}(x,y) = C(F_x(x), F_y(y)) \quad (1)$$

Eine Darstellung der Grundlagen der Copula-Funktionen für die bivariate Häufigkeitsanalyse von hydrologischen Ereignissen ist bei Klein et al. [6] gegeben.

Eine große Anzahl von Copula-Funktionen steht zur Verfügung, um die Abhängigkeit der Zufallsvariablen zu beschreiben. Die Parameter dieser Funktionen werden über Abhängigkeitsmaße zwischen den Zufallsvariablen, wie den Rangkorrelationskoeffizienten von Kendall oder Spearman oder durch Maximum-Likelihood-Schätzer unter Verwendung der Rangzahlen ermittelt. Um die Korrelationsstrukturen der Zufallsvariablen zu ermitteln, reicht in der Regel die verfügbare Datenbasis der Hochwasserereignisse nicht aus. Mit einem stochastischen Niederschlagsgenerator und einem deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modell (NA-Modell) können unter bestimmten Annahmen lange synthetische Abflusszeitreihe erzeugt werden, um die erforderlichen Parameterverteilungen und -abhängigkeiten zu ermitteln. Im Ergebnis kann mit einer Copula-Funktion z. B. die

Beziehung zwischen den Scheitelwerten und den Füllen beschrieben werden.

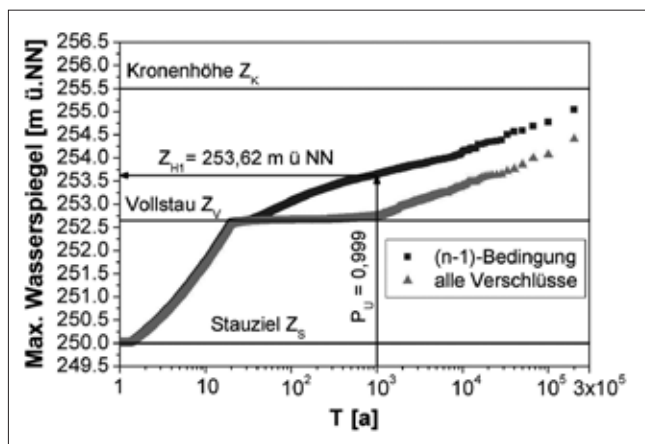
Bei den bivariaten Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Ereignissen müssen zwei Fälle betrachtet werden: die Wahrscheinlichkeit, dass beide Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  größer als die Werte  $x$  bzw.  $y$  sind, sowie die Wahrscheinlichkeit, dass entweder  $X$  oder aber  $Y$  die Werte  $x$  bzw.  $y$  überschreiten.

Demzufolge gibt es zwei Wiederkehrintervalle zu beachten: Das Wiederkehrintervall für das logische ODER (Operator " $\vee$ ") ist immer kleiner oder gleich dem Minimum der beiden univariaten Wiederkehrintervallen  $T_x$  und  $T_y$ , das Wiederkehrintervall für das logische UND (Operator " $\wedge$ ") dagegen größer oder gleich dem Maximum der beiden Wiederkehrintervalle:

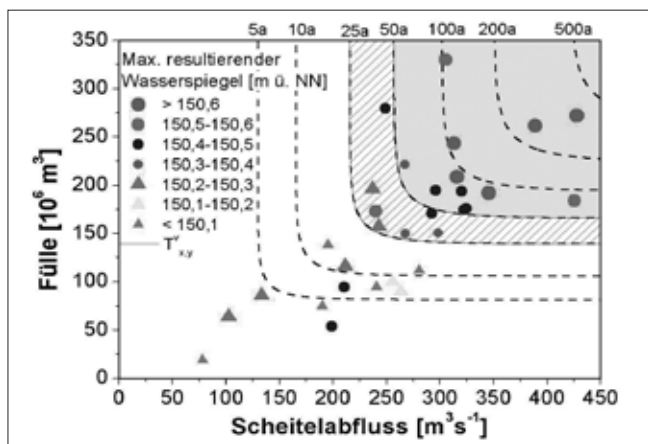
$$T_{x,y}^{\vee} \leq \min[T_x, T_y] \leq \max[T_x, T_y] \leq T_{x,y}^{\wedge} \quad (2)$$

### 4 Anwendungsbeispiele

Für eine Talsperre in Nordrhein-Westfalen wurde eine Zuflussreihe über 2000 Jahre durch Kopplung eines Niederschlagsgenerators mit einem N-A-Modell in Stundenritten simuliert. Die 2 000 Ereignisse mit Jahreshöchstabflüssen wurden getrennt nach Ereignissen mit einem (51 %) bzw. zwei Scheiteln (39 %) statistisch analysiert. Mit Hilfe von Copula-Funktionen wurden jeweils bivariate Wahrscheinlichkeitsverteilungen zwischen Scheitel und Fülle bzw. Fülle und Scheitelanstiegszeit ermittelt. Diese wurden dann zur Generierung von 200 000 Ganglinien genutzt. Für die Einzelwellen wurde aus der bivariaten



**Bild 2:** Empirische Verteilung der resultierenden Wasserspiegelhöhen für 200 000 Simulationen mit und ohne (n-1)-Bedingung



**Bild 3:** Maximale aus den hydrologischen Szenarien resultierende Wasserspiegelhöhen

Andreas Schumann, Bastian Klein, Markus Schulte and Uwe Petry

### Safety and Remaining Risk – Estimation of Manifold Hydrological Loads for Reservoirs

The German Standard for reservoirs DIN 19 700 admits retention in dam safety proofs. To characterize the hydrological loads beside the peak, other characteristics as shape and volume of the floods are needed. As statistical return periods of floods are defined by peak flows only, new multiple statistical characteristics are needed to characterize such hydrological loads. An option are Copula functions which characterize bivariate probability distribution functions.

Андреас Шуманн, Бастиан Кляйн, Маркус Шульте и Уве Петри

### Надежность и остаточный риск – определение многообразных гидрологических расчетных случаев нагрузки для водохранилищных плотин

В связи с принятым стандартом DIN 19 700 для определения характеристики гидрологической нагрузки требуется принимать во внимание не только задерживающую способность, но и форму и наполнение паводковой кривой при пике паводка. Так как данные для статистического интервала возврата волны касаются только гребня, должны быть предоставлены дополнительные вероятностные данные. Возможность для этого представляют двумерные распределения, которые могут быть описаны с помощью копула-функций.

Verteilung zunächst ein Zufallspaar Scheitel und Fülle generiert sowie anschließend bei Vorgabe der Fülle aus der bedingten Verteilung der Scheitelanstiegszeiten eine zugehörige Scheitelanstiegszeit gewählt. Für Doppelwellen wurden jeweils zwei Einzelwellen verschnitten, wozu zusätzlich die relative Lage des Scheitels (erste oder zweite Position) und der zeitliche Abstand der Scheitel aus univariaten Verteilungen gewählt wurden. Der Gangliniengenerator wurde an den simulierten 2 000 Hochwasserereignissen überprüft [4]. Mit Hilfe der großen Zahl generierter Ganglinien wurde unter Vorgabe von Randbedingungen (z. B. (n-1)-Regel) eine probabilistische Bewertung zur Wahrscheinlichkeit der Überschreitung kritischer Stauinhalte durchgeführt. Ein exemplarisches Beispiel, das eine sehr große Sicherheit gegen Kronenstau verdeutlicht, ist in **Bild 2** dargestellt.

Auf der Grundlage einer derartigen Risikoabschätzung können Veränderungen der Hochwasserentlastungsanlagen bzw. der Betriebsregeln mit Wirkung auf das Retentionsverhalten probabilistisch bewertet werden.

Das zweite Beispiel verdeutlicht die Möglichkeiten der Nutzung bivariater statistischer Bewertungen aus der Definition von

komplexeren Wahrscheinlichkeitswerten. Für die Talsperre Straußfurt an der Unstrut wurden 30 Hochwasserszenarien (verschiedene Ganglinien und Scheitel) hinsichtlich kritischer Stauhöhen und damit zu hoher unregelmäßiger Abgaben an den Unterlauf bewertet. Die Scheitelabflüsse und Füllen wurden durch gemeinsame Jährlichkeiten (unter Nutzung des logischen „oder“) multivariat bewertet. **Bild 3** zeigt, dass ein kritischer Stauspiegel von 150,3 m. ü. NN bei allen Ereignissen mit einem Wiederkehrintervall größer  $T_{x,y}^v = 50$  a auftritt, d. h. dass sowohl große Scheitel als auch große Füllen (mit univariaten Jährlichkeiten von jeweils mindestens 50 a) zu kritischen Zuständen führen, bei  $T_{x,y}^v$  zwischen 50 und 25 a 5 von 7 Ereignissen kritisch sind und bei  $T_{x,y}^v < 25$  a nur noch 2 von 12 Ereignissen als kritisch zu bewerten sind. Mit derartigen Analysen kann die Effektivität des Hochwasserschutzes und das Restrisiko wesentlich differenzierter bewertet werden als durch einzelne Hochwasserwellen.

## 5 Zusammenfassung

Die Berücksichtigung der Vielfalt hydrologischer Belastungen ist eine Vorausset-

zung für die Bewertung der Sicherheit und des Restrisikos. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass hydrologische Messreihen diese Vielfalt repräsentieren. Stattdessen sollten durch neue, insbesondere multivariate stochastische Ansätze weitergehende Analysen erfolgen, die eine differenzierte Aussage zur Belastbarkeit erlauben als dies mit herkömmlichen Bemessungswellen möglich ist.

### Autoren

**Professor Dr. Andreas Schumann**  
**Dipl.-Ing. Markus Schulte**

Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Hydrologie,  
Wasserwirtschaft und Umwelttechnik  
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum  
andreas.schumann@rub.de  
markus.schulte@rub.de

**Dr. Bastian Klein**

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)  
Referat M2 – Wasserhaushalt,  
Vorhersagen, Prognosen  
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz  
Klein@bafg.de

**Dipl.-Geogr. Uwe Petry**

Niedersächsischer Landesbetrieb  
für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz Betriebsstelle Süd  
Rudolf-Steiner-Straße 5  
38120 Braunschweig  
Uwe.petry@nlwkn-bs.niedersachsen.de

### Literatur

- [1] Norm DIN 19 700: Stauanlagen: Teil 10-Gemeinsame Festlegungen, Teil 11-Talsperren, Teil 12-Hochwasserrückhaltebecken. Berlin: Beuth-Verlag, 2004.
- [2] Lohr, H.: Generierung extremer Abflüsse für die Stauanlagenbemessung. In: Wasser und Abfall (2003), Heft 7-8, S. 20-24.
- [3] Klein, B.; Schumann, A.: Generierung von mehrgipfligen Bemessungsganglinien für die Hochwasserbemessung von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken. In: Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft (2006), Heft 15.06, Band 2, S. 255-266.
- [4] Schulte, M.; Klein, B.; Schumann, A.: Statistische Generierung von mehrgipfligen Hochwasserereignissen. In: Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft (2009).
- [5] Sackl, B.: Ermittlung von Hochwasser-Bemessungsganglinien in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten. In: Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der TU Graz (1994), Band 13.
- [6] Klein, B.; Pahlow, M.; Hundedea, Y.; Schumann, A.: Probability analysis of hydrological loads for the design of flood control systems using copulas. In: ASCE Journal of Hydrologic Engineering (2009). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000204](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000204) (early view).