

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Bender, Jens; Mudersbach, Christoph; Jensen, Jürgen**

## **Verwendung diskreter Abflusszeitreihen für die Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103366>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bender, Jens; Mudersbach, Christoph; Jensen, Jürgen (2015): Verwendung diskreter Abflusszeitreihen für die Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 57-68.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Verwendung diskreter Abflusszeitreihen für die Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen

Jens Bender  
Christoph Mudersbach  
Jürgen Jensen

Für die statistische Ermittlung von bemessungsrelevanten Hochwasserereignissen sollten langjährige Abflusszeitreihen verwendet werden. Für die numerische Verarbeitung werden die i. d. R. kontinuierlich aufgezeichneten Abflusszeitreihen in eine diskrete Form überführt. Die Diskretisierungszeitspanne richtet sich dabei nach den Ansprüchen der angestrebten Datenverwendung. In der Praxis werden Abflusszeitreihen häufig mit einer minimalen zeitlichen Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung gestellt, aber auch 60 Minuten, oder 24 Stunden sind gängige Diskretisierungszeitspannen. Generell gehen mit der Diskretisierung jedoch besonders bei Hochwasserabflüssen zum Teil sehr große Informationsverluste einher. Wie stark dieser Informationsverlust ausfällt, hängt neben der Diskretisierungszeitspanne nicht zuletzt von der Einzugsgebietsgröße des betrachteten Gewässers ab. In diesem Beitrag wird der Einfluss der Diskretisierung auf die extremwertstatistische Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße aufgezeigt. Dazu werden Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeiten  $T$  für 371 langjährige und zeitlich hochaufgelöste Abflusszeitreihen unterschiedlicher Einzugsgebietsgrößen in Deutschland ermittelt. Anschließend werden die Zeitreihen schrittweise diskretisiert und die entsprechenden Hochwasserabflüsse erneut bestimmt. Aus dem Vergleich der Hochwasserabflüsse auf Basis der diskretisierten Zeitreihen und den Hochwasserabflüssen der hochaufgelösten Zeitreihen, können so Rückschlüsse auf die Eignung bestimmter Diskretisierungszeitspannen für die Ermittlung von Hochwasserbemessungsabflüssen abgeleitet werden.

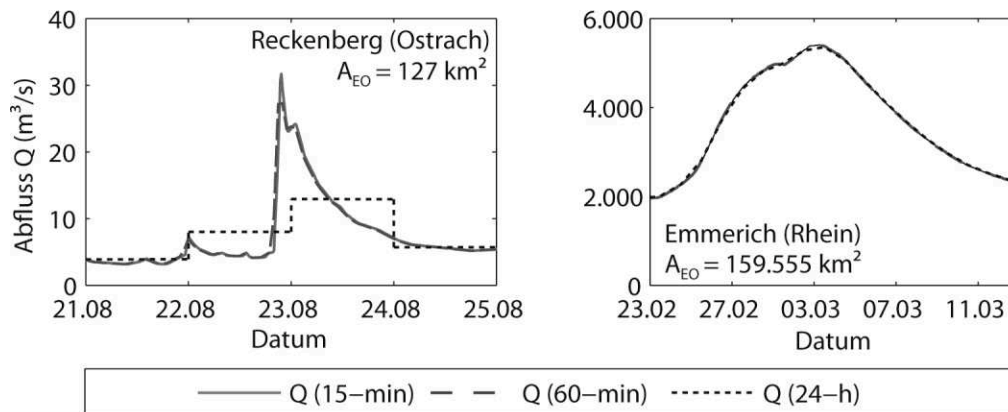
Stichworte: Hochwasserbemessungsabflüsse, Diskretisierung, Informationsverlust

## 1 Einführung

Statistische Auswertungen sollten in der Ingenieurhydrologie generell auf langjährig gemessenen Zeitreihen (Abflusszeitreihen) basieren (DWA 2012; Bender et al. 2014). Über die kontinuierliche Beobachtung der hydrologischen Größe werden sich stetig ändernde Systemzustände erfasst, die sich in derselben Form nicht wiederholen. Der kontinuierliche Abflussverlauf ist mathematisch aller-

dings nicht darstellbar. Somit ist es für eine numerische Auswertung erforderlich, die kontinuierlichen Messungen in diskrete Daten zu überführen. Mit der Wahl des Zeitschritts  $\Delta t$  der Diskretisierung ist unweigerlich ein Informationsverlust verbunden, da der tatsächliche Verlauf des Abflusses mit diskreten Daten nur genähert wiedergegeben werden kann. Im Wesentlichen hängt der Informationsverlust innerhalb eines Zeitschritts  $\Delta t$  mit der Geschwindigkeit der Abflussänderung innerhalb  $\Delta t$  ab. Generell lässt sich feststellen, dass der Informationsverlust umso größer ist, je größer die Änderung des Abflusses innerhalb eines Zeitschritts ist. Daher erhöht sich der Informationsverlust i. d. R. während eines Hochwasserereignisses, da während dieser Zeit (schnelle) Abflussänderungen zu beobachten sind. Die Geschwindigkeit der Abflussänderung wiederum ist u. a. abhängig von der Größe des Einzugsgebiets  $A_{EO}$ , da in kleineren Einzugsgebieten Abflussänderungen meistens schneller ablaufen als in großen. Darüber hinaus hat das zeitliche Auftreten einer Hochwasserwelle einen Einfluss auf den Grad des Informationsverlustes. Tritt der Scheitelwert beispielsweise am Ende eines Zeitintervalls auf, wird ein Teil der Hochwasserganglinie in dem Mittelwert des Zeitintervalls  $t$  und der andere Teil im Zeitintervall  $t+1$  berücksichtigt. Wohingegen bei einem Auftreten des Scheitels in der Mitte eines Zeitintervalls zur vollen Berücksichtigung bei der Mittelwertbildung in  $t$  führt.

Abbildung 1 stellt den Einfluss einer Diskretisierung beispielhaft für zwei unterschiedlich große Einzugsgebiete und für verschiedene Zeitschritte dar. Im linken Teil von Abbildung 1 ist eine Hochwasserganglinie des Pegels Reckenberg (Gewässer Ostrach) mit einer Einzugsgebietsgröße von  $A_{EO} = 127 \text{ km}^2$  abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der Scheitelwert der Hochwasserwelle bei einer Zeitreihe mit 15 min Mittelwerten ( $\Delta t = 15 \text{ min}$ ) bei  $Q_{S,15 \text{ min}} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt. Bei  $\Delta t = 60 \text{ min}$  reduziert sich der Scheitelwert bereits auf  $Q_{S,60 \text{ min}} = 27 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei  $\Delta t = 24 \text{ h}$  auf  $Q_{S,24 \text{ h}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ . Unter der Annahme, dass die 15 min Zeitreihe die tatsächliche Abflussganglinie des Pegels repräsentiert (d. h. kein Informationsverlust vorliegt), entspricht dies einer Abnahme von ca. 61 %. Auf der rechten Seite in Abbildung 1 wird demgegenüber die Abflussganglinie eines Hochwasserereignisses am Pegel Emmerich (Gewässer Rhein) mit einem Einzugsgebiet von  $A_{EO} = 159.555 \text{ km}^2$  dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass alle drei Ganglinien nahezu identisch sind und der Informationsverlust wesentlich geringer ist.



**Abbildung 1:** Informationsverlust infolge zeitlicher Diskretisierung von Abflusszeitreihen in Abhängigkeit verschiedener Einzugsgebietsgrößen

Die Wahl eines sinnvollen Diskretisierungszeitschritts hängt somit im Wesentlichen von der Einzugsgebietsgröße  $A_{EO}$  des betrachteten Einzugsgebiets ab. Darüber hinaus spielt aber auch die Aufgabenstellung für die die Daten verwendet werden sollen eine Rolle. Der Diskretisierungszeitschritt wird umso kleiner gewählt werden müssen, je genauer die Abflusskurve abgebildet werden muss. Bei jährlichen Wasserbilanzen beispielsweise, können Monatsmittelwerte ausreichend sein, wohingegen bei Analysen von Hochwasserereignissen deutlich geringere Zeitschritte notwendig sind. In einer Vielzahl von Studien werden für die univariate extremwertstatistische Auswertung von Hochwasserabflüssen Zeitreihen mit einem relativ großen Zeitschritt von  $\Delta t = 24$  h (Tagesmittelwerte) verwendet, ohne dass auf den Einfluss der Diskretisierung eingegangen wird. In der Literatur finden sich kaum Hinweise oder Empfehlungen für die Verwendung von Diskretisierungszeitschritten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße und der Datenverwendung. Lediglich Maniak (2010) greift die Thematik auf, erwähnt aber eher allgemeingültig: *"Bei Abflüssen aus Einzugsgebieten von mehr als 10000 km<sup>2</sup> reichen oft Tagesschritte aus."*

Es ist anzunehmen, dass die Wahl des Diskretisierungszeitschritts einen deutlichen Einfluss auf die Ermittlung von Hochwasserbemessungsabflüssen hat und die Ergebnisse in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße teilweise erheblich beeinflusst. In diesem Beitrag werden Abflusszeitreihen von Pegeln mit Einzugsgebietsgrößen von  $A_{EO} = 1,37$  bis  $159.555$  km<sup>2</sup> und mit zeitlichen Auflösungen von  $\Delta t = 15$  min, 60 min und 24 h statistisch analysiert. Die Untersuchungen sollen den Einfluss der Datendiskretisierung auf die Ermittlung von Bemessungshochwasserereignissen darstellen und Richtwerte für eine sinnvolle Verwendung von diskretisierten Zeitreihen für extremwertstatistische Auswertungen liefern.

## 2 Methodik

Bei der statistischen Analyse von Hochwasserdaten ist man häufig an der Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen einer bestimmten Jährlichkeit  $T$  interessiert. Daher ist es naheliegend, als Maß für den Einfluss von diskretisierten Ausgangsdatenreihe die Differenz von Bemessungshochwasserabflüssen der Jährlichkeit  $T$  als Kriterium heranzuziehen. Dazu werden hochaufgelöste Abflusszeitreihen verschiedener Einzugsgebietsgrößen als Ausgangszeitreihen verwendet. Abflusszeitreihen mit einer Auflösung von  $\Delta t = 15$  min sind als kleinstes standardmäßiges Zeitintervall bei den zuständigen Landesbehörden und Pegelbetreibern verfügbar. Auf Basis dieser Zeitreihen erfolgt die Kollektivbildung für die statistischen Untersuchungen. Hier werden die jährlichen Maximalabflüsse (AMAX) verwendet, die unter Berücksichtigung des Unabhängigkeitskriteriums nach Svensson et al. (2005) in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße aus den Abflusszeitreihen gewonnen werden. Im nächsten Schritt wird eine Extremwertverteilungsfunktion an das Kollektiv angepasst und es werden die Bemessungshochwasserereignisse der Jährlichkeiten  $T_{15 \text{ min}} = 10, 20, 50$  und  $100$  a bestimmt. Um ein vergleichbares Vorgehen für alle Pegel zu gewährleisten, wird auf die Anpassung verschiedener Verteilungsfunktionen und anschließende Anpassungstests verzichtet und es wird lediglich die Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) angepasst; die Parameterschätzung erfolgt über die Maximum-Likelihood Methode.

Im nächsten Schritt wird auf Basis der 15 min Zeitreihe eine Mittelwertbildung mit einem Zeitschritt von  $\Delta t = 60$  min und  $\Delta t = 24$  h durchgeführt, d. h. die Zeitreihen werden nachträglich mit einem größeren Zeitschritt diskretisiert. Anschließend wird die o. g. Vorgehensweise, d. h. Kollektivbildung und Anpassung der AEV, wiederholt und die entsprechenden Bemessungshochwasserereignisse  $HQ_{T,60\text{min}}$  bzw.  $HQ_{T,24\text{h}}$  berechnet. Die Güte der Bemessungshochwasserabflüsse auf Basis der 60 min und 24 h diskretisierten Zeitreihen lässt sich dann über das Verhältnis  $R$  zu dem Bemessungshochwasserereignissen auf Basis der 15 min Zeitreihe bestimmen:

$$R_{60\text{min}} = \frac{HQ_{T,60\text{min}}}{HQ_{T,15\text{min}}} \text{ bzw. } R_{24\text{h}} = \frac{HQ_{T,24\text{h}}}{HQ_{T,15\text{min}}}. \quad (1)$$

Generell sind Werte von  $R < 1$  zu erwarten, was bedeutet, dass die Bemessungshochwasserereignisse nach der weiteren Diskretisierung geringer ausfallen als die Ereignisse die auf Basis der 15 min Zeitreihen gewonnen wurden. Werte von  $R = 1$  implizieren, dass beide gewonnenen Hochwasserereignisse identisch sind. Bei Werten von  $R > 1$  fallen die Bemessungshochwasserereignisse auf Basis der

60 min-, bzw. 24 h Zeitreihe höher aus als auf Basis der 15 min Zeitreihe. Theoretisch betrachtet ist dieser Fall nicht möglich, da mit zunehmenden Wert von  $\Delta t$  die Werte der Stichprobe nur geringer werden können und somit auch die Bemessungsereignisse geringer ausfallen müssen.

Die Anwendung dieser Methodik auf eine Vielzahl von Abflusszeitreihen mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen gibt dann Aufschluss darüber, bei welcher Einzugsgebietsgröße eine Diskretisierung mit entsprechendem Zeitintervall zu einer maßgeblichen Abweichung der Bemessungswerte gegenüber denen aus den hochaufgelösten Zeitreihen gewonnenen führt.

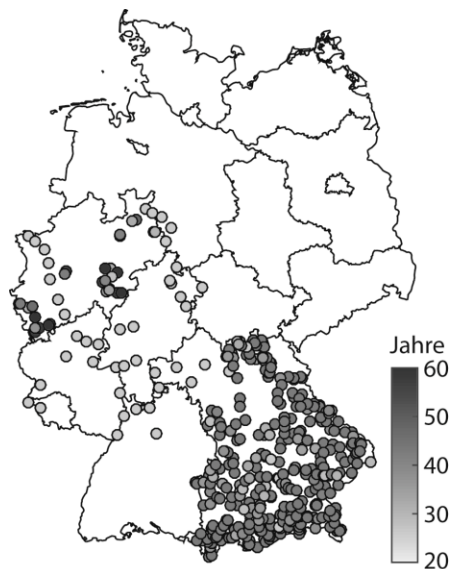
### 3 Datengrundlage

Für die Untersuchungen wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Abflusszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von  $\Delta t = 15$  min zur Verfügung gestellt, sowie entsprechende Daten von der Onlineplattform des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) bezogen. Somit befinden sich, mit Ausnahme einiger Pegel der BfG, alle Pegel in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Bayern. Bei allen Zeitreihen handelt es sich um geprüfte Abflusswerte der zuständigen Behörde. Neben der Anforderung, ein möglichst großes Spektrum von Einzugsgebietsgrößen zu verwenden, wurden für die Verwendung folgende Anforderungen an die Zeitreihen gestellt:

- Aufzeichnungsdauer mindestens 25 Jahre
- keine Aufzeichnungslücken
- keine Beeinflussungen durch Speicher im Oberlauf, Rückstau o.ä.

Insbesondere bei der letzten Anforderung ist anzumerken, dass es nicht eindeutig möglich ist einen Pegel als speicherbeeinflusst zu klassifizieren. In den Einzugsgebieten größerer Gewässer, wie beispielsweise dem Rhein, finden sich häufig Talsperren und andere künstliche Speicher. Es gibt jedoch keine allgemeingültige Festlegung ab welchem Grad des Speicherausbaus ein Pegel als beeinflusst gilt. Daher wird ein Pegel als speicherbeeinflusst klassifiziert und damit abgelehnt, wenn sich eine Angabe dazu in den Stammdaten des Pegels wiederfindet.

Insgesamt entsprechen 371 Pegelzeitreihen den o.g. Anforderungen (Abbildung 2).

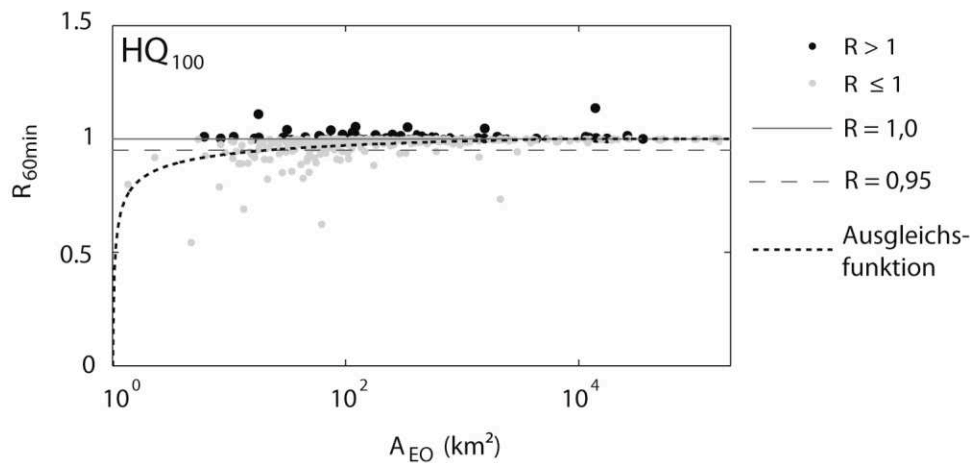


**Abbildung 2:** Verwendete Abflusszeitreihen mit den entsprechenden Aufzeichnungslängen

## 4 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse für den Fall der  $R_{60\text{min}}$ -Werte (Gleichung 1) für einen Hochwasserbemessungsabfluss der Jährlichkeit  $T = 100$  a ( $HQ_{100}$ ) dargestellt. In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass eine Diskretisierung der Ausgangszeitreihen mit  $\Delta t = 60$  min weitestgehend  $HQ_{100}$ -Werte liefert, die denen auf Basis der hochaufgelösten Ausgangszeitreihe entsprechen. Insbesondere bei Einzugsgebietsgrößen ab  $100 \text{ km}^2$  liegen die meisten resultierenden Hochwasserhältnisse in einem Bereich zwischen 0,95 und 1. Bei kleineren Einzugsgebieten ( $A_{\text{EO}} < 100 \text{ km}^2$ ) hat die Diskretisierung einen stärkeren Einfluss auf die Berechnung der Bemessungswerte. Wenn auch der Großteil der  $R_{60\text{min}}$ -Werte oberhalb von 0,95 liegt, ist eine deutliche Zunahme der Varianz festzustellen und es wird der Wert von 0,95 vermehrt nicht erreicht.

Obwohl  $R_{60\text{min}}$  theoretisch nur Werte von maximal 1 annehmen kann (der Informationsverlust infolge von Diskretisierung kann nicht zu einer Erhöhung des Scheitelwertes führen), finden sich einige Werte mit  $R_{60\text{min}} > 1$  (in Abbildung 3 schwarz markiert). In diesen Fällen hat die Diskretisierung dazu geführt, dass für das Kollektiv ein stärker ausgeprägter positiver Krümmungsparameter der Allgemeinen Extremwertverteilung geschätzt wurde und die Verteilung somit einen stärker ausgeprägten konkaven Verlauf besitzt. Dies wiederum führt dann zu größeren Bemessungswerten, besonders im Extrapolationsbereich.



**Abbildung 3:** Verhältnis der Hochwasserereignisse der Jährlichkeiten  $T = 100, 50, 20, 10$  aus 15 min und 60 min Abflusszeitreihen ( $R_{60\text{min}}$ )

Es stellt sich die generelle Frage, ab welcher Einzugsgebietsgröße 60 min-Mittelwerte des Abflusses für extremwertstatistische Analysen verwendet werden können. Dazu wird eine parametrische Ausgleichsfunktion an die Beobachtungswerte von  $R_{60\text{min}}$  und die logarithmierten Einzugsgebietsgrößen  $A_{EO}$  angepasst. Unter der Annahme, dass eine hinreichend genaue Bestimmung des "wahren" Bemessungswertes mit einer Fehlertoleranz von 5 % erreicht ist, liegt die gesuchte Einzugsgebietsgröße dort, wo die Ausgleichsfunktion einen Wert von  $R_{60\text{min}} = 0,95$  erreicht. Vergleichend werden die Ergebnisse zudem noch für eine Fehlertoleranz von 2 %, d. h.  $R_{60\text{min}} = 0,98$  angegeben. Um zu vermeiden, dass die nicht plausiblen Werte von  $R_{60\text{min}} > 1,0$  die Anpassung der Ausgleichsfunktion verzerren, werden sie bei der Anpassung nicht berücksichtigt.

In diesem Fall liefert eine Potenzfunktion (in Abbildung 3 schwarz-gestrichelt) unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate (siehe z. B. Papula, 2011) in der Form:

$$R_{60\text{min}}(\log(A_{EO})) = \begin{cases} a \cdot \log(A_{EO})^b + c & \text{für } R_{60\text{min}}(\log(A_{EO})) \leq 1 \\ 1 & \text{für } R_{60\text{min}}(\log(A_{EO})) > 1 \end{cases} \quad (2)$$

die beste Anpassungsgüte. Dabei bezeichnet  $\log(A_{EO})$  die logarithmierte Einzugsgebietsgröße;  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind die ermittelten Parameter der Potenzfunktion. Da die Funktionen bei sehr großen Einzugsgebietsgrößen Werte größer 1 annehmen kann, wird die Potenzfunktion nur für  $R_{60\text{min}} \leq 1$  definiert; Werte darüber hinaus werden mit  $R_{60\text{min}} = 1$  angesetzt. Tabelle 1 stellt die Funktionsparameter sowie die resultierenden Einzugsgebietsgrößen in Abhängigkeit des Bemessungshochwasserereignisses (für  $T = 100, 50, 20, 10$ ) dar, bei denen die Ausgleichsfunktion den Wert von  $R_{60\text{min}} = 0,95$ , bzw.  $R_{60\text{min}} = 0,98$  erreicht.

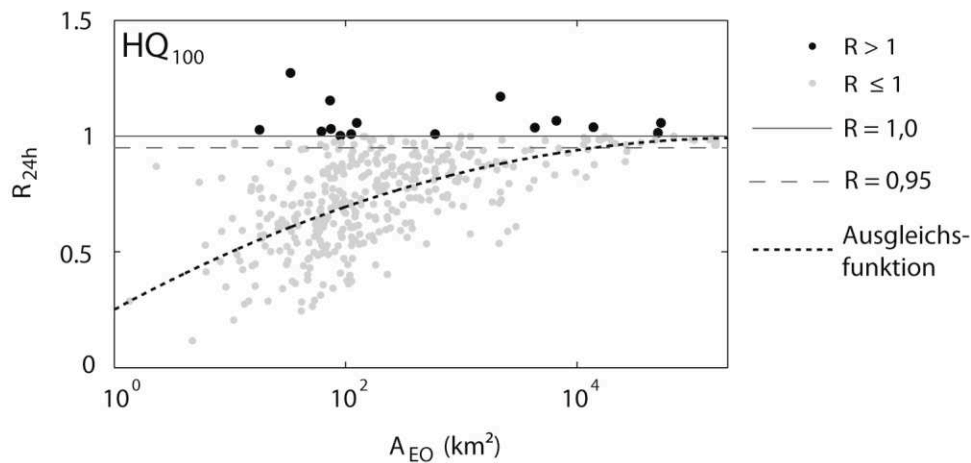


**Tabelle 1:** Parameter der Potenzfunktionen für die Bemessungshochwasserabflüsse  $HQ_T$  für  $T = 100, 50, 20$  und  $10$  Jahren, sowie  $R_{60\min} = 0,95$  und  $R_{60\min} = 0,98$  in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße

$HQ_T$	Funktionsparameter			$R_{60\min} = 0,95$	$R_{60\min} = 0,98$
	$a$	$b$	$c$	$A_{EO} \text{ (km}^2\text{)}$	$A_{EO} \text{ (km}^2\text{)}$
$HQ_{100}$	-0,2436	-0,3332	1.1180	21	250
$HQ_{50}$	-0,2221	-0,3231	1,1110	15	170
$HQ_{20}$	-0,2159	-0,2970	1,1151	12	130
$HQ_{10}$	-0,2067	-0,2910	1,1119	10	110

Für die Berechnung eines Bemessungshochwasserabflusses mit dem Wiederkehrintervall von  $T = 100$  Jahren auf Basis einer Abflusszeitreihe mit  $\Delta t = 60$  min können (rechnerisch) somit Pegel mit Einzugsgebietsgrößen von  $A_{EO} > 21$  km<sup>2</sup> verwendet werden. Bei Abflusszeitreihen kleinerer Einzugsgebiete ist zu erwarten, dass die Ergebnisse den tatsächlichen Bemessungswert unterschätzen. Zur Bestimmung eines  $HQ_{50}$  hingegen reduziert sich die erforderliche Einzugsgebietsgröße auf 15 km<sup>2</sup>, für das  $HQ_{20}$  auf 12 km<sup>2</sup> und für das  $HQ_{10}$  auf 10 km<sup>2</sup>. Sollte die Forderung nach einer geringeren Fehlertoleranz, z. B. 2 % (d. h.  $R_{60\min} = 0,98$ ) bestehen, führt das zu einer Erhöhung der notwendigen Einzugsgebietsgrößen um etwa das Zehnfache (Tabelle 1). Somit lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass die Verwendung von Stundenmittelwerten des Abflusses von Einzugsgebieten  $> 250$  km<sup>2</sup> zu relativ großen Genauigkeiten bei der Ermittlung von Bemessungshochwasserereignissen führt.

Analog zu der Vorgehensweise zur Ermittlung der  $R_{60\min}$  - Werte lassen sich im nächsten Schritt die Verhältnisse der  $HQ_T$  auf Basis der 24 h Ausgangszeitreihe bestimmen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind ebenfalls beispielhaft für das  $HQ_{100}$  in Abbildung 4 dargestellt. Wie zu erwarten, liegen die Werte von  $R_{24h}$  deutlich unter denen von  $R_{60\min}$ . Dies ist dadurch zu erklären, dass der Informationsverlust durch die Diskretisierung bei Tagesmittelwerten wesentlich größer ist als bei Stundenmittelwerten. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Varianz von  $R_{24h}$  mit abnehmender Einzugsgebietsgröße deutlich zunimmt.



**Abbildung 4:** Verhältnis der Bemessungshochwasserereignisse der Jährlichkeiten  $T = 100, 50, 20, 10$  aus 15-min und 24-h Abflusszeitreihen

Für Einzugsgebietsgrößen  $> 20.000 \text{ km}^2$  liegen die meisten Werte innerhalb der 5 % Fehlertoleranz ( $R_{24h} > 0,95$ ). Im Bereich kleinerer Einzugsgebiete hingegen, ergeben sich häufig nur noch Werte im Bereich von  $0,20 > R_{24h} > 0,95$ .

Wie auch in der vorherigen Betrachtung wird eine Ausgleichsfunktion mittels der Methode der kleinsten Quadrate an die vier Kollektive ( $HQ_{100}, HQ_{50}, HQ_{20}, HQ_{10}$ ) angepasst. In diesem Fall eignet sich eine Polynomfunktion 2. Grades in der Form

$$R_{24h}(\log(A_{EO})) = \begin{cases} p_1 \cdot (\log(A_{EO}))^2 + p_2 \cdot \log(A_{EO}) + p_3 & \text{für } R_{24h}(\log(A_{EO})) \leq 1 \\ 1 & \text{für } R_{24h}(\log(A_{EO})) > 1 \end{cases} \quad (3)$$

am besten. Auch hier wird die Ausgleichsfunktion lediglich für  $R_{24h}$ -Werte  $\leq 1$  definiert, da sie rechnerisch bei großen Einzugsgebieten Werte  $> 1$  annimmt.

Unter Berücksichtigung dieser Ausgleichsfunktionen kann beispielsweise ein Bemessungshochwasserabfluss der Jährlichkeit  $T = 100$  Jahren auf Basis von Tagesmittelwerten erst ab einer Einzugsgebietsgröße von  $A_{EO} = 24.000 \text{ km}^2$  verlässlich innerhalb eines Fehlertoleranzbereichs von 5 % bestimmt werden. Erhöht man den Toleranzbereich auf 2 %, erhöht sich die minimale Einzugsgebietsgröße sogar auf  $85.400 \text{ km}^2$ . Die Funktionsparameter, sowie die erforderlichen Einzugsgebietsgrößen für  $R_{24h} = 0,95$  und  $R_{24h} = 0,98$  sind für die untersuchten Jährlichkeiten  $T$  in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 2:** Parameter der Polynomfunktionen für die Bemessungshochwasserabflüsse  $HQ_T$  für  $T = 100$ , 50, 20 und 10 Jahren, sowie  $R_{24h} = 0,95$  und  $R_{24h} = 0,98$  in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße

$HQ_T$	Funktionsparameter			$R_{24h} = 0,95$	$R_{24h} = 0,98$
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$A_{EO} \text{ (km}^2\text{)}$	$A_{EO} \text{ (km}^2\text{)}$
$HQ_{100}$	-0,00328	0,09404	0,33510	24.000	85.400
$HQ_{50}$	-0,00346	0,09751	0,32310	20.100	67.000
$HQ_{20}$	-0,00371	0,10170	0,30840	18.600	64.000
$HQ_{10}$	-0,00372	0,10260	0,30220	18.000	58.900

## 5 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Untersuchungen zeigen, dass die Diskretisierung von Abflusszeitreihen einen bedeutenden Einfluss auf die statistische Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen hat. Insbesondere bei kleinen Einzugsgebieten (z. B.  $A_{EO} < 1000 \text{ km}^2$ ) und großen Diskretisierungsperioden (z. B.  $\Delta t = 24 \text{ h}$ ), ist der Informationsverlust durch die Diskretisierung derart groß, dass eine zuverlässige Ermittlung von Bemessungswerten nicht mehr möglich erscheint. Die hier vorgestellten Ergebnisse unterstreichen daher die Notwendigkeit, für die Ermittlung von Bemessungsereignissen möglichst hochaufgelöste Zeitreihen als Grundlage zu verwenden. Häufig stehen in der Praxis aber nur diskretisierte Werte in Form von Stunden- oder Tagesmittelwerten zur Verfügung. Dies ist insbesondere für Aufzeichnungsperioden in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts der Fall, in der noch keine kontinuierliche Erfassung von Wasserständen bzw. Abflüssen flächendeckend verfügbar war. Für diese Situation können die hier ermittelten Ausgleichsfunktionen dazu verwendet werden, die Ergebnisse auf Basis der diskretisierten Zeitreihen in Abhängigkeit der betrachteten Einzugsgebietsgröße mit einem Korrekturfaktor zu versehen.

Es ist jedoch anzumerken, dass die hier durchgeführten Untersuchungen auf bereits diskretisierten Zeitreihen basiert. Das heißt, die bereits durchgeführte Diskretisierung mit  $\Delta t = 15 \text{ min}$  hat bereits einen, wenn auch geringen, Informationsverlust zur Folge, der an dieser Stelle keine Berücksichtigung finden kann. Aus diesem Grund ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen zur Verallgemeinerung dieser Thesen durchzuführen und, wenn möglich, auf Basis tatsächlicher Abflussscheitelwerte ebenfalls den Einfluss einer Diskretisierung mit  $\Delta t = 15 \text{ min}$  auf die Ermittlung von Hochwasserbemessungsabflüssen abzuschätzen.

## 6 Literatur

- Bender, J., Wahl, T., Jensen, J. (2014): Multivariate design in the presence of non-stationarity, *Journal of Hydrology*, 514, 123-130.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt M 552 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure, 6. Auflage, Springer
- Papula, L. (2011): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung, 6. Auflage, Springer Verlag Heidelberg.
- Svensson, C., Kundzewicz, Z.W, Maurer, T. (2005): Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series, *Hydrological Sciences Journal*, 50 (5), 811 – 824.

Autoren:

Jens Bender, M.Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt  
Universität Siegen  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57076 Siegen

Tel: +49 271 740 3401

Fax: +49 271 740 2722

E-Mail: [jens.bender@uni-siegen.de](mailto:jens.bender@uni-siegen.de)  
[juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)

Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach

Institut für Wasser und Umwelt  
Hochschule Bochum  
Lennershofstr. 140  
44801 Bochum

Tel: +49 234 3210249

E-Mail: [christoph.mudersbach@hs-bochum.de](mailto:christoph.mudersbach@hs-bochum.de)