

Christoph Mudersbach und Jens Bender

Ein Bemessungsansatz für wasserwirtschaftliche Infrastruktur bei instationären Bedingungen

An approach to the assessment of designing water infrastructure under nonstationary conditions

Ein wesentlicher Aspekt in der wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis ist die Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen. Zur Festlegung der Bemessungsgrößen bedient man sich der Methodik der Extremwertstatistik. Die klassischen Verfahren der Extremwertstatistik, welche sich auch in den einschlägigen Regelwerken wiederfinden, setzen voraus, dass die Daten stationär sind, also keine langfristigen zeitlichen Änderungen aufweisen. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass hydrologische Zeitreihen kein stationäres Verhalten aufweisen. Bei instationären hydrologischen Rahmenbedingungen ändern sich nicht nur die hydrologischen Kenngrößen, sondern zugleich auch die Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse. In der wasserwirtschaftlichen Praxis besteht gegenwärtig eine Lücke im systematischen Umgang mit sich ändernden Bemessungswerten. Für die nachhaltige Bemessung von wasserwirtschaftlicher Infrastruktur bedarf es somit neuer Konzepte, die diesen Änderungen in den Zeitreihen Rechnung tragen. Mit dem vorgestellten Bemessungsansatz liegt ein systematischer Ansatz zur Bemessung von wasserwirtschaftlichen Infrastrukturanlagen bei instationären Bedingungen vor, bei dem die Bemessung auf der Vorgabe einer Bauwerkslebensdauer und einer Überschreitungswahrscheinlichkeit innerhalb dieser Bauwerkslebensdauer basiert.

Schlagwörter: Jährlichkeit, Bemessung, wasserwirtschaftliche Infrastruktur, Instationarität, Extremwertstatistik, Zeitreihen, Wahrscheinlichkeit, Klimawandel

The design of water infrastructure is based mainly on hydrological parameters for a given return period. The underlying frequency analysis presupposes stationarity of the analysed times series. In fact, many meteo-hydrological data such as water levels, precipitation and discharges exhibit different kinds of nonstationary behavior. Hence, there is a lack of systematic design of water infrastructure when dealing with non-stationary boundary conditions. The method introduced here makes possible the design of water infrastructure under nonstationary conditions based on a prescribed non-exceedance probability considering the proposed life time of the structure to be designed.

Keywords: return period, water infrastructure, nonstationarity, frequency analysis, time series, probability, climate change

1 Einleitung

Ein wesentlicher Aspekt in der wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis ist die Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen. Dies können Bemessungsregenereignisse, -abflüsse oder -wasserstände sein. Zur Festlegung der Bemessungsgrößen bedient man sich i.d.R. extremwertstatistischer Methoden. Basierend auf beobachteten oder modellierten Daten (z.B. Regen- oder Abflusszeitreihen) werden mittels Extremwertverteilungsfunktionen Quantile (z.B. 99%-Quantil der Unterschreitungswahrscheinlichkeit) berechnet, die dann als Basis für die Festlegung von Bemessungswerten (z.B. HQ_{100}) verwendet werden können. Die klassischen Verfahren der Extremwertstatistik setzen voraus, dass die Daten stationär sind, also keine langfristigen zeitlichen Änderungen aufweisen (Witt et al. 1998).

Es zeigt sich jedoch deutlich, dass hydrologische Zeitreihen kein stationäres Verhalten aufweisen (Milly et al. 2008). Das Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (Field 2012) betont, dass eine andauernde Erderwärmung die Häufigkeit, die Intensität und die räumliche Verteilung von klimatischen Extremereignissen verändern wird. Es wurde durch vielfältige Studien gezeigt, dass klimatische Extremereignisse in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben (Commou & Rahmstorf 2012; Van den Besselaar et al. 2012). In diesem Zusammenhang wird regelmäßig einerseits die Frage nach der Signifikanz und andererseits nach der Ursache der Instationaritäten (anthropogene Ursache vs. klimatische Änderungen) diskutiert (Obeysekera & Salas

2016). Diese Fragen sind nach Meinung der Autoren berechtigt, jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Veröffentlichung.

Es ist auffällig, dass derzeit in den einschlägigen Regelwerken zur methodischen Ermittlung der Bemessungsereignisse noch keine instationären Ansätze implementiert sind (DWA 2012a, 2012b), demgegenüber jedoch Normen zur grundsätzlichen Auslegung der Wasserinfrastruktur ein solches Vorgehen einfordern. So wird beispielsweise in DIN EN 752:2015-10 ausgeführt, dass „[...] Bemessungskriterien zu erwartende Durchflussänderungen über die Nutzungsdauer eines Entwässerungssystems berücksichtigen müssen, wenn diese nicht anderweitig in der Bemessung berücksichtigt sind. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels sollten in Betracht gezogen werden. Damit wird sichergestellt, dass der Abwasserkanal auch weiterhin die Leistungskriterien über die Nutzungsdauer des Systems erfüllt.“ Im Gegensatz dazu wird in DIN 19700-10:2004-07 für die Bemessung von Stauanlagen unter anderem die Verwendung von möglichst langen Pegelzeitreihen empfohlen, darin enthaltene Unsicherheiten durch klimatische Änderungen werden jedoch nicht thematisiert.

In der wasserwirtschaftlichen Praxis besteht somit gegenwärtig eine Lücke im systematischen Umgang mit sich ändernden Bemessungswerten. Erst in jüngsten Veröffentlichungen (Haberlandt 2016) wird empfohlen, die Anwendung instationärer Extremwertstatistiken in Betracht zu ziehen. Die Gründe für die bisherige Nichtberücksichtigung von instationären Bemessungs-

ansätzen sind vielfältig, jedoch sind insbesondere die folgenden Gründe naheliegend:

- In der wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis hat sich seit vielen Jahrzehnten das Konzept des „mittleren Wiederkehrintervalls“ bzw. der „Jährlichkeit“ etabliert, welches jedoch nur bei stationären Bedingungen plausible Ergebnisse liefert (Serinaldi 2015). Im Kontext von instationären Zeitreihen führen die o.g. Begriffe zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen.
- Wasserwirtschaftliche Bemessungswerte bestimmen die Dimensionierung der gesamten Wasserinfrastruktur, weshalb Veränderungen in den Bemessungsansätzen zusätzliche Investitionen verursachen können. Sich stetig verändernde Bemessungswerte sind aus den hydrologischen Randbedingungen vergleichsweise leicht abzuleiten, ständige Veränderungen an der Wasserinfrastruktur sind dagegen kaum möglich. Bei der Verwendung von instationären Bemessungsansätzen ist daher ein ergänzendes Bemessungskonzept erforderlich, welches z.B. die Lebenszeit des Bauwerkes mit einbezieht.

Bei instationären hydrologischen Rahmenbedingungen ändern sich nicht nur die hydrologischen Kenngrößen, sondern zugleich auch die Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse. Instationäre extremwertstatistische Methoden wurden in den letzten 10 Jahren zunehmend diskutiert. Die Anzahl der entsprechenden Veröffentlichungen ist stetig angewachsen. An dieser Stelle wird exemplarisch auf einige Veröffentlichungen verwiesen, die sich sowohl mit Küstenwasserständen und Abflüssen als auch mit Niederschlagsdaten befassen: Coles 2001; Katz et al. 2002; Mudersbach & Jensen 2010; Aghakouchak et al. 2013; Cheng & Aghakouchak 2014; Vasiliades et al. 2015; Mudersbach et al. 2015; Read & Vogel 2016; Wi et al. 2016.

Für die nachhaltige Bemessung wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen bedarf es somit neuer Konzepte, die diesen Änderungen in den Zeitreihen Rechnung tragen. Hierzu gibt es einige Publikationen mit Ansätzen, die das Konzept der Jährlichkeit auf den instationären Fall übertragen. Aghakouchak et al. (2013) beschreiben, wie sich die Jährlichkeiten bzw. die Überschreitungswahrscheinlichkeiten eines Ereignisses bei einer instationären Zeitreihe über die Zeit ändern und welchen Einfluss unterschiedliche instationäre extremwertstatistische Ansätze auf diese haben. Es wird jedoch kein Ansatz vorgestellt, nach dem eine konkrete Bemessung erfolgen kann. Rootzén & Katz (2013) stellen einen Bemessungsansatz für instationäre Bedingungen vor, bei dem neben der Bemessungslebensdauer eine Wahrscheinlichkeit vorgegeben wird, mit der ein bestimmter Wert innerhalb der Lebensdauer überschritten wird. Der so ermittelte Wert stellt den Bemessungswert dar und wird als *Design Life Level* (DLL) bezeichnet. Salas & Obeyseker (2014) fassen in einer umfangreicheren Arbeit die bisherigen Konzepte zur hydrologischen Bemessung bei instationären Bedingungen zusammen und geben eine Reihe von Beispielen. Obeyseker & Salas (2014) entwickeln Methoden, unter anderem auf Basis von Bootstrap-Ansätzen, um Konfidenzbereiche für instationäre extremwertstatistische Verfahren zu berechnen. Read & Vogel (2015) stellen ebenfalls die Grundlagen der instationären Bemessungsverfahren zusammen und diskutieren den Einfluss unterschiedlicher Verteilungsfunktionen auf die Ergebnisse. Obeyseker & Salas (2016) heben die Bedeutung von instationären Bemessungsverfahren in einem instationären Klima hervor und befürworten neben der Bemessung nach der mittleren Wiederkehrzeit (Jährlichkeit) auch eine Bemessung

nach einer vorgegebenen Anzahl von Extremereignissen innerhalb der Lebensdauer.

In der Praxis haben die genannten Methoden noch keine breite Anwendung gefunden. Vielmehr wurden in den letzten Jahren stark vereinfachte Ansätze verwendet, um den Instationaritäten in der Bemessung Rechnung zu tragen. Eine Methode besteht darin, am Ende der Bauwerkslebensdauer eine bestimmte Jährlichkeit zu fordern. Somit soll beispielsweise der Wert ermittelt werden, der im Bemessungsjahr eine Jährlichkeit von $T = 100$ a aufweist. Diese Methode ist unter anderem bei der Bemessung von Küstenschutzbauwerken häufig angewendet worden und wird als *Mean-Sea-Level-offset-method* bezeichnet (Mudersbach et al. 2013). Eine andere Methode wird seit dem Jahr 2004 in Bayern und Baden-Württemberg verwendet, die auf einem sogenannten Klimazuschlag basiert (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit 2013).

Das Ziel der vorliegenden Veröffentlichung ist (a) die Stärkung des Bewusstseins für die Notwendigkeit der Anwendung instationärer Bemessungsansätze, (b) die Vorstellung eines systematischen instationären Bemessungsansatzes, (c) eine Anwendung auf den Pegel Köln und (d) der Vergleich des neuen Ansatzes mit bisherigen Ideen zum Umgang mit instationären Bemessungswerten. Dazu werden in Kapitel 2 die theoretischen Hintergründe zu stationären und instationären Bemessungsansätzen vorgestellt. Kapitel 3 beinhaltet die Anwendung des instationären Bemessungsansatzes auf den Pegel Köln und in Kapitel 4 erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit bisher verwendeten Ansätzen.

2 Bemessungsansätze für wasserwirtschaftliche Infrastruktur

2.1 Bisherige Konzepte bei Stationarität

Das Konzept der Jährlichkeit T basiert auf der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses X in jedem Jahr gleich ist und zudem voneinander unabhängig. Die Wahrscheinlichkeit p_e (engl.: *exceedance probability*) für das Auftreten bzw. die Überschreitung des Ereignisses X in einem Jahr ergibt sich dann aus

$$p_e = \frac{1}{T} \tag{1}$$

Die Wahrscheinlichkeit p_{ne} (engl.: *non-exceedance probability*) des Nicht-Auftretens bzw. der Unterschreitung ist dann das komplementäre Ereignis zu p_e , welches sich ergibt zu $p_{ne} = 1 - p_e$. Für das 100-jährliche Hochwasserereignis ($HQ_{100}, T = 100$ a) resultiert somit eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von

$$p_e = \frac{1}{100a} = 0,01 \frac{1}{a} \tag{2}$$

und eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von

$$p_{ne} = 1 - p_e = 1 - 0,01 \frac{1}{a} = 0,99 \frac{1}{a} \tag{3}$$

Der zugehörige Abflusswert kann aus der Quantilfunktion der verwendeten Extremwertverteilung (z.B. Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) oder Pareto Verteilung (GPD)) berech-

net werden. Um im Folgenden keine separate Unterscheidung vornehmen zu müssen, wird der zur Jährlichkeit T zugehörige Merkmalswert (z.B. Abfluss, Wasserstand, Niederschlag) allgemein mit z_T bezeichnet.

Im stationären Fall wird nun davon ausgegangen, dass sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit p_e über die Zeit nicht ändert und somit eine konstante Größe ist. Die Bemessung wasserwirtschaftlicher Infrastrukturanlagen basiert im Wesentlichen auf der Festlegung einer geeigneten Jährlichkeit (z.B. $T = 10$ a, 50 a, 100 a) und der Auslegung der Anlage auf den entsprechenden Merkmalswert z_T (z.B. z_{10} , z_{50} , z_{100}). Aus der Annahme der Stationarität und der Unabhängigkeit der Ereignisse kann nun in einem weiteren Schritt das sogenannte hydrologische Risiko für das Auftreten eines Ereignisses Z innerhalb einer Zeitspanne n berechnet werden. Die Anwendung des hydrologischen Risikos ist in vielen wissenschaftlichen Arbeiten erfolgt (Obeysekera & Salas 2016 und darin enthaltene Referenzen für eine Übersicht), jedoch hat sich dieser Ansatz bislang nicht in den Bemessungsvorgaben für wasserwirtschaftliche Infrastrukturanlagen manifestiert. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass der Begriff des hydrologischen Risikos von dem allgemeinen Begriff des Risikos abzugrenzen ist, da mittlerweile das Risiko auch in der Wasserwirtschaft eine weiterführende Definition erfahren hat und als das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit eines schadenauslösenden Ereignisses und dem daraus resultierenden Schaden definiert ist (Mudersbach & Jensen 2008).

Das hydrologische Risiko kann über die Binomialverteilung bestimmt werden. Mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Binomialverteilung lässt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit p_k berechnen, dass ein Ereignis Z mit der zugehörigen Überschreitungswahrscheinlichkeit p_e innerhalb einer Zeitspanne n genau k-mal eintritt:

$$p_k = p_e^k (1 - p_e)^{n-k} \binom{n}{k} \quad (4)$$

Die Binomialverteilung kann für große n und kleine p_e hinreichend gut durch die Poisson-Verteilung approximiert werden ($\lambda = p_e$):

$$p_k = \frac{(\lambda n)^k}{k!} e^{-\lambda n} \quad (5)$$

Für eine wasserwirtschaftliche Anlage ist nun in der Regel die Frage von Bedeutung, wie groß die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass ein Ereignis Z innerhalb einer Zeitspanne von n Jahren keinmal ($k = 0$) eintritt. Dies kann nun sowohl mittels der Binomial- als auch der Poisson-Verteilung berechnet werden, indem gilt:

$$p_{k=0} = (1 - p_e)^n \quad (\text{Binomialverteilung}) \quad (6)$$

$$p_{k=0} = e^{-\lambda n} \quad (\text{Poisson-Verteilung}) \quad (7)$$

Somit kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für das Nicht-Auftreten eines 100-jährlichen Ereignisses (z_{100}) innerhalb einer Zeitspanne von $n = 100$ Jahren berechnet werden zu:

$$p_{k=0} = (1 - p_e)^n = (1 - 0,01)^{100} = 0,366 \quad (\text{Binomialverteilung}) \quad (8)$$

$$p_{k=0} = e^{-\lambda n} = e^{-0,01 \cdot 100} = 0,368 \quad (\text{Poisson-Verteilung}) \quad (9)$$

Das komplementäre Ereignis, was zugleich der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Zeitspanne n entspricht und als hydrologisches Risiko bezeichnet wird, ergibt sich dann zu:

$$p_{k \geq 1} = 1 - p_{k=0} = 1 - (1 - p_e)^n = 0,634 \text{ bzw. } 0,632 \quad (10)$$

Für die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen kann nun als Zeitspanne n zweckmäßigerweise die geplante Lebensdauer N des Bauwerkes angesetzt werden. Der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer N und der Überschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses ist in Abbildung 1 am Beispiel von drei Ereignissen mit den Jährlichkeiten $T = 50$ a, 100 a, 200 a dargestellt. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten innerhalb der Lebensdauer N, für die hier die Bezeichnung EPN (*engl. exceedance probability N*) eingeführt wird, wurden jeweils mit der Binomialverteilung berechnet. Aus der Abbildung ist ein elementarer Zusammenhang für den Fall zu erkennen, dass die Jährlichkeit des Ereignisses gleich der Lebensdauer des Bauwerkes ($T = N$) ist. Für diesen Fall ergibt sich jeweils eine EPN von:

$$EPN = 0,634 = 63,4\% \quad (11)$$

In Tabelle 1 sind für einige typische Bemessungsjährlichkeiten die Überschreitungswahrscheinlichkeiten während Bauwerkslebensdauern von 50 und 100 Jahren im stationären Fall dargestellt. Ein plakatives Beispiel stellt die Auslegung von Talsperren gegenüber dem Bemessungshochwasserzufluss 2 (BHQ₂) dar, welcher bei der Talsperrenklasse 1 eine Jährlichkeit von $T = 10.000$ a Jahren aufweisen muss und aus der Forderung resultiert, dass innerhalb einer Zeitspanne von 100 Jahren die Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungshochwasserzufluss 1 % betragen soll.

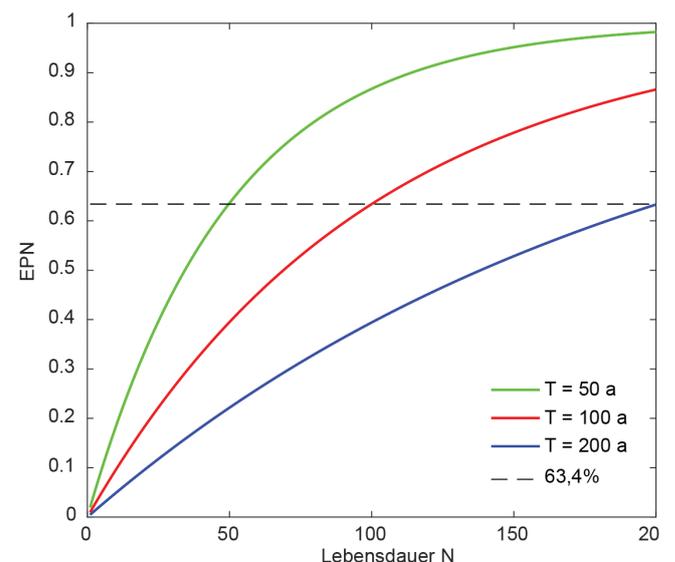


Abbildung 1
Zusammenhang zwischen Lebensdauer N und Überschreitungswahrscheinlichkeit EPN eines Ereignisses mit vorgegebener Jährlichkeit T auf Basis der Binomialverteilung.
Correlation between project life N and EPN based on a prescribed return period T using a binomial distribution.

Tabelle 1

EPN (in %) für typische Bemessungsjährlichkeiten bei Bauwerkslebensdauern von 50 und 100 Jahren im stationären Fall.

Exceedance probabilities (in %) of typical design return periods for project lives 50 and 100 years.

Lebensdauer N	Jährlichkeit					
	T = 20 a	T = 50 a	T = 100 a	T = 200 a	T = 1.000 a	T = 10.000 a
50a	92,3 %	63,6 %	39,5 %	22,2 %	4,9 %	0,5 %
100a	99,4 %	86,7 %	63,4 %	39,4 %	9,5 %	1,0 %

2.2 Neue Konzepte bei Instationarität

Bei instationären Bedingungen ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit p_e eines Ereignisses z_T über die Zeit nicht konstant, sondern ändert sich. Liegt beispielsweise in der zu untersuchenden Zeitreihe ein ansteigender Trend vor, so steigt auch die Überschreitungswahrscheinlichkeit p_e stetig an bzw. die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p_{ne} sinkt kontinuierlich. Insofern muss eine zeitliche Entwicklung von p_e und p_{ne} berücksichtigt werden, indem für jedes Jahr i entsprechende Werte $p_{e,i}$ und $p_{ne,i}$ berechnet werden. Das EPN-Konzept kann konsequent auf den instationären Fall erweitert werden, wobei die Betrachtungen immer von einem Referenzjahr (z.B. aktuelles Jahr; Index 0) und von einem Planungshorizont (= Referenzjahr + Lebensdauer N; Index N) ausgehen. Als Beispiel ist ein bestimmter Abfluss Q gegeben, der zum Referenzjahr eine Jährlichkeit von $T = 100$ a aufweist. Damit erhält dieser Abfluss die Bezeichnung $z_{100,0}$ mit der zugehörigen

Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_{e,0} = 0,01 \frac{1}{a}$ ($T_0 = 100$ a)

im Referenzjahr. Unter der Annahme eines ansteigenden Trends in der Zeitreihe nimmt auch die Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_{e,i}$ bis zum Planungshorizont stetig zu, bis dass ein Wert von $p_{e,N}$ erreicht ist.

Ausgehend von Gleichungen (8) und (10) kann die EPN für den stationären Fall auch geschrieben werden als

$$EPN = 1 - (1 - p_e)^N = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_e) \tag{12}$$

Für den instationären Fall gilt somit analog

$$EPN = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{e,i}) \tag{13}$$

Unter der Annahme, dass im stationären Fall bei einer Bauwerkslebensdauer von $N = 100$ Jahren eine EPN von 63,4 % als ein ausreichendes Sicherheitsniveau für die zu planende wasserwirtschaftliche Anlage angesehen wird, kann nun im instationären Fall basierend auf Gleichung (13) diejenige Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_{e,0}$ für das Referenzjahr numerisch ermittelt werden, für welche sich auch im instationären Fall eine EPN von 63,4 % ergibt. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit für das Referenzjahr $p_{e,0}$ ist im instationären Fall somit der für die Bemessung gesuchte relevante Parameter, weshalb für diesen Parameter die Bezeichnung DEP (*engl.: design exceedance probability*) eingeführt wird. Für die Jährlichkeit im Referenzjahr wird die Bezeichnung DRP (*engl.: design return period*) verwendet, wobei gilt

$$DRP = \frac{1}{DEP} \tag{14}$$

Mit der konsequenten Erweiterung des EPN-Konzeptes auf den instationären Fall liegt somit ein systematischer Ansatz zur Bemessung von wasserwirtschaftlichen Infrastrukturanlagen bei instationären

Bedingungen vor. Die eigentliche Bemessung basiert dabei im Gegensatz zum stationären Fall nicht auf der alleinigen Vorgabe eines Sicherheitsniveaus in Form einer Jährlichkeit T, sondern auf der Vorgabe einer EPN und einer Bauwerkslebensdauer N. Der beschriebene Bemessungsansatz wurde von Rootzen & Katz (2013) mit der Bezeichnung *Design Life Level* (DLL) erstmalig publiziert. In der vorliegenden Arbeit wird ergänzend zu Rootzen & Katz (2013) der Schwerpunkt der Bemessung auf die Bestimmung der maßgebenden Überschreitungswahrscheinlichkeit für das Referenzjahr (DEP) gelegt.

Eine wesentliche Grundlage für die Anwendung des instationären Bemessungsansatzes bildet die Berechnung der zeitabhängigen Veränderungen der Überschreitungswahrscheinlichkeiten $p_{e,i}$. Diese können über die Methoden der instationären Extremwertstatistik berechnet werden, deren Grundlagen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden und stattdessen auf weiterführende Literatur verwiesen wird (Coles 2001, Aghakouchak et al. 2013). Im sich anschließenden Beispiel finden Ergebnisse einer instationären Extremwertstatistik Anwendung.

3 Beispielauswertung am Pegel Köln

Der in Kapitel 2.2 beschriebene instationäre Bemessungsansatz wird am Beispiel der Abflusszeitreihe des Pegels Köln (Rhein) angewendet. Als Ausgangsdaten standen die Abflussdaten als Tagesmittelwerte vom 1.11.1900 bis zum 31.10.2013 zur Verfügung, welche von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt wurden. Aus den Daten wurde zunächst basierend auf hydrologischen Jahren die Zeitreihe der Jahreshöchstwerte (AMAX) ermittelt, welche in Abbildung 2a abgebildet ist. Die Zeit-

reihe weist einen linearen Trend von $s = 10,3 \frac{m^3}{s \cdot a} \pm 5,3 \frac{m^3}{s \cdot a}$ auf,

was unter Zugrundelegung des 1σ -Bereiches einen signifikanten Trend darstellt.

Auf Basis der AMAX-Zeitreihe wurde eine instationäre extremwertstatistische Analyse durchgeführt, indem die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (*engl.: generalized extreme value distribution, GEV*) mit zeitabhängigen Parametern an die Daten angepasst wurde. Die allgemeine Form der instationären GEV lautet (Coles 2001):

$$GEV(x, t) = \exp \left[- \left(1 - k(t) \cdot \frac{x - a(t)}{b(t)} \right)^{\frac{1}{k(t)}} \right] \tag{15}$$

wobei x der entsprechende Merkmalswert ist und $a(t), b(t), k(t)$ die zeitabhängigen Parameter der Verteilungsfunktion (Lage-, Streuungs- und Krümmungsparameter) sind. Im vorliegenden

Fall wurde nur für den Lageparameter ein lineares Zeitmodell der Form $a(t) = a_1 t + a_2$ verwendet und die Parameter a_1 und a_2 über ein gleitendes Zeitfenstermodell mit einer Fensterlänge von 30 Jahren mittels der L-Momente (Mudersbach 2009) geschätzt. Der Streuungs- und Krümmungsparameter wurden als konstant angesetzt; dieses Modell wird allgemein mit der Bezeichnung GEV(1.0.0) versehen, wobei die 1 für ein lineares Zeitmodell und die 0 für ein zeitunabhängiges Modell steht. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Wahl eines geeigneten instationären Extremwertmodells. Beispielsweise können auch nichtlineare Zeitmodelle verwendet werden, oder mehrere Parameter der Verteilungsfunktion als zeitabhängig betrachtet werden. Es sollten in jedem Fall umfangreiche Sensitivitätsstudien und Tests erfolgen, um das Modell zu wählen, welches das zeitabhängige Verhalten der Daten am besten beschreibt. Die Komplexität der Lösungsalgorithmen nimmt sowohl mit der Wahl der Zeitmodelle, als auch mit der Anzahl der zeitabhängigen Parameter zu. Hieraus resultieren Unsicherheiten in den erzielten Ergebnissen, die bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Es sei an dieser Stelle aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich eine vergleichbare Problematik auch bei der stationären Extremwertstatistik ergibt. Durch die Vielzahl der Methoden zur Bildung von Extremwertkollektiven und Parameterschätzungen, sowie der Verwendung unterschiedlicher Extremwertverteilungen sind die Unsicherheiten mitunter groß; oftmals werden diese Unsicherheiten jedoch nicht kommuniziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Themenkomplex, der sowohl die stationäre als auch die instationäre Extremwertstatistik betrifft, nicht weiter diskutiert. Für den interessierten Leser wird hierzu auf weiterführende Literatur verwiesen (Coles 2001; Aghakouchak et al. 2013; Arns 2014; Serinaldi & Kilsby 2015).

Das Ergebnis der instationären extremwertstatistischen Analyse ist in Abbildung 2a dargestellt, in der die zeitliche Entwicklung verschiedener Hochwasserquantile (z_{20} , z_{50} , z_{100} , z_{200} , z_{500} , z_{1000}) zu erkennen ist und bis zum Jahr 2112 extrapoliert wurde. Für die weitere Auswertung wurde das letzte Jahr der Beobachtungsdaten (2013) als Referenzjahr verwendet und eine geplante Lebensdauer von $N = 100$ Jahren angenommen, womit sich als Planungshorizont das Jahr 2112 ergibt. Betrachtet man nun die Abflusswerte der Hochwasserquantile zum Referenzjahr, so wird sich durch den instationären Prozess (ansteigender Trend) die Unterschreitungswahrscheinlichkeit ($1 - p_{e,i}$) über die Zeit stetig verringern bzw. die Überschreitungswahrscheinlichkeit ($p_{e,i}$) stetig vergrößern. Diese Entwicklungen sind der Abbildung 2b und 2c zu entnehmen.

Mittels Gleichung (13) kann nun die EPN für jedes Hochwasserereignis mit der Jährlichkeit T_0 im Referenzjahr berechnet werden (Abb. 3). Beispielsweise ergibt sich für das Hochwasserereignis von $z_{100,0} = 11.351 \text{ m}^3/\text{s}$, was im Referenzjahr eine Jährlichkeit von $T_0 = 100$ a hat, für eine angenommene Lebensdauer eines Hochwasserschutzbauwerks (z.B. Deich) von 100 Jahren eine EPN von 87,2 %. Dies liegt deutlich über der EPN im stationären Fall von 63,4 %. Anhand der markierten Referenzlinie von 63,4 % kann abgelesen werden, dass bei den vorliegenden instationären Bedingungen am Pegel Köln ein Hochwasserereignis mit einer Jährlichkeit zwischen $T_0 = 200$ a und $T_0 = 500$ a im Referenzjahr (DRP) gewählt werden muss, um das gleiche Sicherheitsniveau wie im stationären Fall gewährleisten zu können.

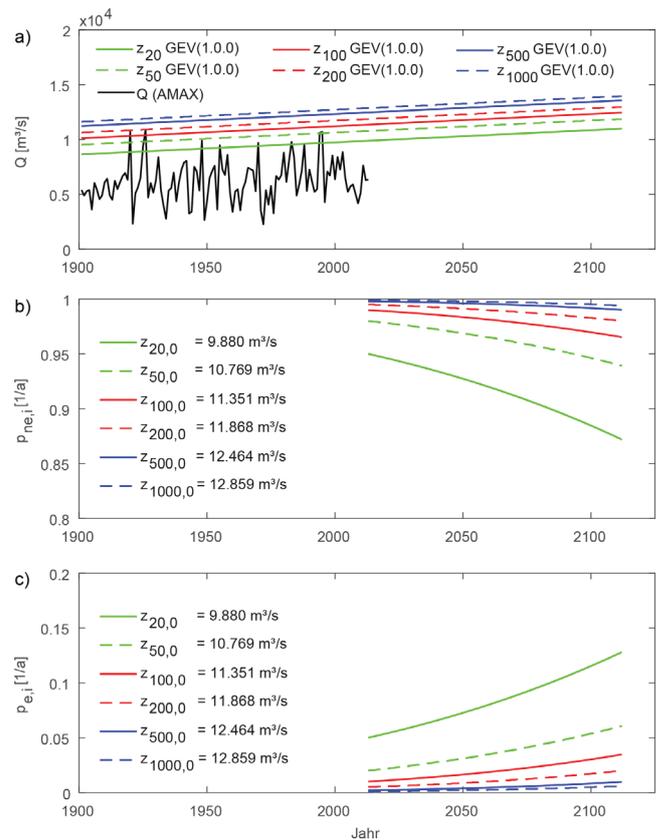


Abbildung 2
 a) Jährliche Maximalwerte (AMAX) des Abflusses am Pegel Köln (Rhein) mit zeitabhängigen Hochwasserquantilwerten, b) Änderung der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Hochwasserquantilwerte (Referenzjahr 2013) über die Zeit, c) Änderung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Hochwasserquantilwerte (Referenzjahr 2013) über die Zeit.
 a) Annual maximum discharge data (AMAX) at gauge Cologne (Rhine river) and time-dependent return levels, b) changes in non-exceedance probability of different return levels (reference year), c) changes in exceedance probability of different return levels (reference year).

Um diese Angabe weiter im Detail betrachten zu können, werden wiederum mittels Gleichung (13) die EPN für eine Lebensdauer von $N = 100$ a am Pegel Köln für die Jährlichkeiten $T_0 = (10,20,30,40,\dots,1000)$ a berechnet (Abb. 4). Der Schnittpunkt zwischen der 63,4 %-Referenzlinie und der ermittelten Funktion ergibt eine benötigte Jährlichkeit im Referenzjahr von

$$DRP = 230 \text{ a, was einer DEP von } DEP = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{230 \text{ a}} = 4,3 \cdot \frac{10^{-3}}{\text{a}}$$

entspricht. Damit lässt sich die Bemessungsaufgabe für das behandelte Beispiel wie folgt zusammenfassen: Bei einer vorgegebenen Bauwerkslebensdauer von $N = 100$ a und einem gewählten Sicherheitsniveau (EPN) von 63,4 % muss bei gegebenen instationären Bedingungen am Pegel Köln eine Jährlichkeit

im Referenzjahr von $DRP = 230 \text{ a}$ ($DEP = 4,3 \cdot \frac{10^{-3}}{\text{a}}$) gewählt werden.

4 Vergleich mit bisher angewendeten Verfahren

Das zuvor ermittelte Ergebnis soll im Folgenden mit bislang in der Bemessungspraxis gängigen Methoden zum Umgang mit instationären Hochwasserquantilwerten verglichen werden. Eine Methode besteht darin, am Ende der Bauwerkslebensdauer eine bestimmte Jährlichkeit von beispielsweise 100 Jahren zu fordern. Somit muss der Abflusswert ermittelt werden, der im Jahr 2112 eine Jährlichkeit von $T_N = 100$ a aufweist. Auch für diese Methode muss eine instationäre Extremwertstatistik erstellt werden, um die Bemessungswerte in die Zukunft zu extrapolieren. Allerdings wird der Überschreitungswahrscheinlichkeit während der Lebensdauer keine Bedeutung beigemessen, sondern es wird ausschließlich auf die Jährlichkeit am Ende der Bauwerkslebensdauer fokussiert. Am Beispiel des Pegels Köln ergibt sich aus der instationären extremwertstatistischen Analyse ein Abfluss mit einer Jährlichkeit von $T = 100$ a im Jahr 2112 von $z_{100,1} = 12.449 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Abfluss wiederum weist für das Referenzjahr 2013 eine Jährlichkeit von etwa $T = 500$ a auf (Abb. 5, Markierung 1).

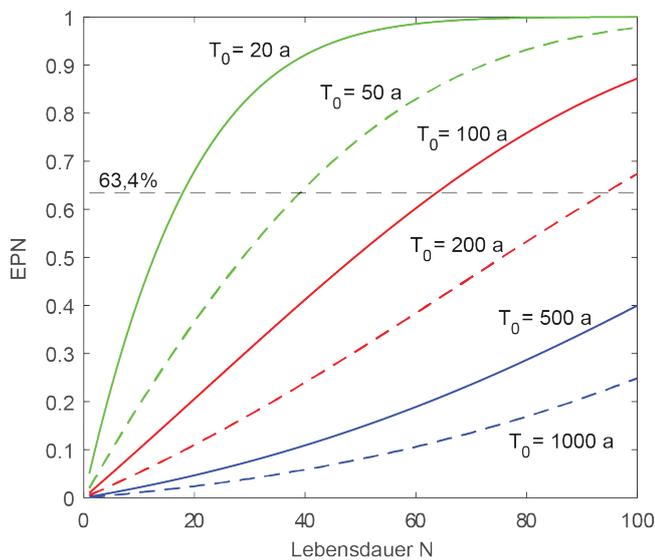


Abbildung 3
Entwicklung der EPN am Pegel Köln für definierte Jährlichkeiten (Referenzjahr 2013) bei instationären Bedingungen.
Development of exceedance probability for different return periods (reference year) under nonstationary conditions at gauge Cologne.

Eine andere Methode wird seit dem Jahr 2004 in Bayern und Baden-Württemberg verwendet. Basierend auf dem Forschungsvorhaben KLIWA wurde ein landesweiter Klimazuschlag (Klimaänderungsfaktor) in Höhe von 15 % auf das 100-jährliche Abflussereignis eingeführt (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit 2013). Somit ergibt sich das bemessungsrelevante Abflussereignis zu:

$$HQ_{100,Klima} = HQ_{100} \cdot 1,15 \quad (16)$$

Im vorliegenden Beispiel würde sich damit ein Bemessungswert berechnen von:

$$HQ_{100,Klima} = z_{100,0} \cdot 1,15 = 11.351 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,15 = 13.053 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (17)$$

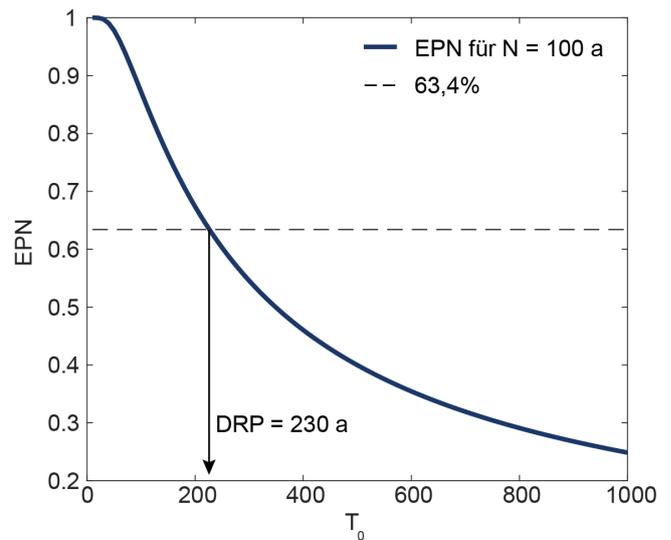


Abbildung 4
Darstellung der EPN am Pegel Köln für eine Lebensdauer von $N = 100$ Jahren (Referenzjahr 2013).
Development of the exceedance probability under nonstationary conditions for a project life of $N = 100$ years at gauge Cologne.

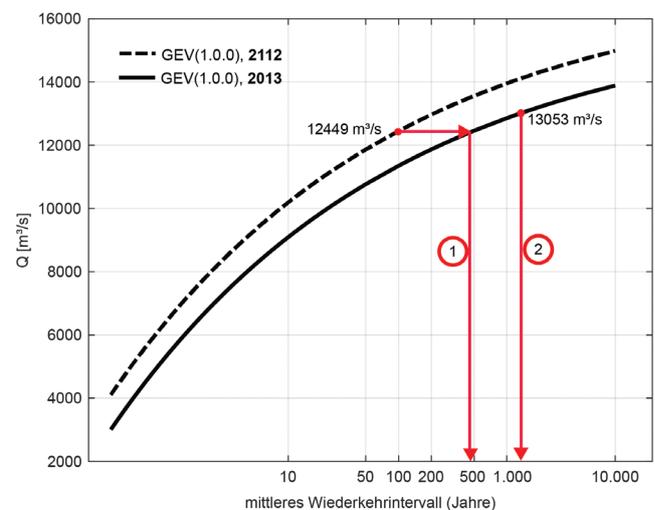


Abbildung 5
Vergleich der Extremwertverteilungsfunktionen (GEV(1.0.0)) am Pegel Köln für die Jahre 2013 und 2012. Die Markierung (1) kennzeichnet die Änderung der Jährlichkeit für einen Abfluss von $Q = 12.449 \text{ m}^3/\text{s}$; die Markierung (2) gibt die Jährlichkeit für einen Abfluss von $13.053 \text{ m}^3/\text{s}$ auf Basis der Verteilungsfunktion von 2013 an.
Comparison of nonstationary extreme value distribution GEV(1.0.0) for 2013 and 2012 at gauge Cologne. Marker 1 shows change of return periods for $Q = 12.449 \text{ m}^3/\text{s}$. Marker 2 shows the return period for $Q = 13.053 \text{ m}^3/\text{s}$ based on the distribution valid for 2013.

Dieser Wert entspricht im Referenzjahr 2013 einer Jährlichkeit von über $T_0 = 1.000$ a (Abb. 5, Markierung 2). Der Vorteil des Klimazuschlag-Verfahrens liegt auf der Hand: Für die Anwendung muss keine separate instationäre extremwertstatistische Berechnung durchgeführt werden, sondern es reichen die in der Regel vorhandenen stationären Berechnungen aus. Demgegenüber können jedoch regionale Unterschiede in den zeitlichen

Änderungen der Parameter nicht berücksichtigt werden. Ebenso werden die Bauwerkslebensdauer und die Überschreitungswahrscheinlichkeit währenddessen nicht in die Betrachtungen einbezogen.

Die Vergleiche zwischen den Methoden zeigen, dass der vorgestellte Bemessungsansatz in diesem Beispiel nach der instationären EPN-Methode, unter Beibehaltung des gleichen Sicherheitsniveaus wie bei stationären Bemessungsansätzen (im Beispiel 63,4 %), zu geringeren Bemessungsjährlichkeiten im Referenzjahr ($230 a < 500 a$ und $230 a < 1.000 a$) und damit zu wirtschaftlicheren Lösungen führt als bislang verwendete Ansätze.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Autoren ein Sicherheitsniveau mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 63,4 % innerhalb einer Bauwerkslebensdauer von $N = 100 a$ nicht als allgemeingültigen und ausreichenden Maßstab postulieren. Vielmehr werden diese Werte verwendet, um zum einen eine Analogie zu bisherigen stationären Bemessungsmethoden herzustellen und zum anderen dem Leser ein praktikables Beispiel zu geben. Selbstverständlich kann im Einzelfall sowohl eine abweichende Bauwerkslebensdauer als auch ein höheres oder niedrigeres Sicherheitsniveau für die konkrete Bemessungsaufgabe angemessen sein.

5 Fazit und Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode für die nachhaltige Bemessung von wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen vor, die Änderungen in den Zeitreihen berücksichtigen kann. Das Konzept basiert auf dem sogenannten hydrologischen Risiko, welches die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass innerhalb der Bauwerkslebensdauer ein bestimmtes Ereignis überschritten wird. Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich mittels der Binomialverteilung berechnen und auch auf instationäre Bedingungen übertragen. Die eigentliche Bemessung basiert dabei im Gegensatz zum stationären Fall nicht auf der alleinigen Vorgabe eines Sicherheitsniveaus in Form einer Jährlichkeit T , sondern auf der Vorgabe einer Bauwerkslebensdauer (N) und einer Überschreitungswahrscheinlichkeit (EPN) innerhalb dieser Bauwerkslebensdauer. Grundsätzlich sei angemerkt, dass eine wesentliche Grundlage zur Anwendung der EPN-Methode die vorherige instationäre extremwertstatistische Analyse der zugrunde liegenden Daten darstellt (Kap. 2.2). Für die Anwendung solcher instationärer Extremwertmethoden gibt es derzeit noch keine einheitlichen Empfehlungen, weshalb eine detaillierte Prüfung der zur Verfügung stehenden mathematischen Modelle unerlässlich ist. Für eine kritische Diskussion zu dieser Thematik wird verwiesen auf Serinaldy & Kilsby (2015). Auch im betrachteten Beispiel ist das Ergebnis abhängig von den gewählten Zeitmodellen für die Parameter der Verteilungsfunktion und deren Extrapolation in die Zukunft, was jeweils kritisch hinterfragte werden sollte. Grundsätzlich kann aber festgehalten werden, dass die Extrapolation von (Verteilungs-)Parametern in einem instationären Klima unerlässlich ist. Es ist weiterhin unwahrscheinlich, dass sich zukünftige Änderungen streng linear verhalten werden, allerdings birgt die Anwendung nicht-linearer Funktionen für eine Extrapolation häufig noch größere Unsicherheiten. Daher können lineare Funktionen durchaus als geeignete Modelle für die Beschreibung langfristiger Änderungen angesehen werden (Aghakouchak et al. 2013).

Ergebnisse und Vergleiche mit bislang in der Bemessungspraxis verwendeten Verfahren zeigen am Beispiel des Pegels Köln, dass der vorgestellte Bemessungsansatz nach der instationären EPN-Methode, unter Beibehaltung des gleichen Sicherheitsniveaus wie bei stationären Bemessungsansätzen (im Beispiel 63,4 %), zu geringeren Bemessungsjährlichkeiten im Referenzjahr und damit zu wirtschaftlicheren Lösungen führt als bislang verwendete Ansätze.

Eine Verallgemeinerung der Aussage, dass der hier vorgestellte instationäre Bemessungsansatz grundsätzlich zu wirtschaftlicheren Lösungen führt (d.h. niedrigere Bemessungsjährlichkeiten ergibt), als bislang in der Bemessungspraxis verwendete Methoden, ist nicht zulässig, da dies stark von den Eigenschaften der betrachteten Daten, der verwendeten instationären Methoden und insbesondere auch von der Validität des Vergleichsverfahrens (z.B. Klimazuschlag-Verfahren) abhängt. Es bleibt jedoch der Vorteil, dass der beschriebene instationäre Bemessungsansatz eine systematische Methode zum Umgang mit instationären Zeitreihen darstellt und daher eine objektivere Ermittlung der benötigten Bemessungswerte ermöglicht.

Summary

The present publication introduces a method for a sustainable design of water infrastructure under nonstationary conditions. The concept is based on the so-called hydrological risk, which is defined as the probability exceeding a certain design level within a given project life. This concept can be transferred from the stationary to the nonstationary case, whereas the probability is calculated using a binomial distribution. The design is therefore not solely based mainly on a given return period, but by predefining both a planned project life and a probability exceeding a certain design level within that project life. However, applying this new concept, here referred to as the EPN-method, this requires a foregoing nonstationary frequency analysis of the respective data. The application of nonstationary frequency analysis is neither uniformly regulated nor exist consistent recommendations until now, thus a detailed sensitivity study is needed in each case. For a critical discussion to that issue the reader is referred to Serinaldy & Kilsby (2015). Also, in the considered pilot study shown the results depend on the used time models for the distribution parameters and their extrapolation to the future. Extrapolating parameters to future time horizons is always a crucial task, however, it is vital in climate change conditions. Furthermore, it is unlikely that future changes in hydrological parameters will have a linear characteristic, but the implementation of non-linear functions for the extrapolation will likely rise the uncertainties. Thus, linear time models can be assumed more likely suitable for the description of long-term climatic changes (Aghakouchak et al. 2013). Results from the gauge Cologne show that applying the EPN-method will result in a lower design return period than alternative approaches used thus far. However, a generalisation of this outcome is not valid, since the results strongly depend on the characteristics of the underlying time series and the nonstationary methods used in frequency analysis. But a substantial argument for applying nonstationary methods still remains; the proposed nonstationary design method is a tool for analysing nonstationary time series in a systematic way and hence, design values will be calculated more objectively.

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach
Hochschule Bochum
Lehrgebiet Wasserwesen (LWH)
Lennershofstr. 140, 44801 Bochum
und
wbu consulting Ingenieurgesellschaft mbH
Schelderberg 16A, 57072 Siegen
christoph.mudersbach@hs-bochum.de

Dr.-Ing. Jens Bender
Universität Siegen
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57076 Siegen
und
wbu consulting Ingenieurgesellschaft mbH
Schelderberg 16A, 57072 Siegen
jens.bender@uni-siegen.de

Literaturverzeichnis

- AGHAKOUCHAK, A., D. EASTERLING, K. HSU, S. SCHUBERT & S. SO-ROOSHIAN (2013): Extremes in a Changing Climate. Detection, Analysis and Uncertainty. Dordrecht: Springer Dordrecht Heidelberg New York London (Water Science and Technology Library, 65)
- ARNS, A. (2014): Regional to local assessment of extreme water levels- Methods and application to the northern part of the German North Sea coastline, Dissertation, Universität Siegen
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT (HRSG.) (2013): Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie. 103 S.
- BORMANN, H., PINTER, N., & ELFERT, S. (2011): Hydrological signatures of flood trends on German rivers: flood frequencies, flood heights and specific stages. *Journal of Hydrology*, 404(1), 50-66
- CHENG, L. & A. AGHAKOUCHAK (2014): Nonstationary precipitation Intensity-Duration-Frequency curves for infrastructure design in a changing climate. In: *Scientific reports* 4, S. 7093. DOI: 10.1038/srep07093
- COLES, S. (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, London
- COUMOU, D., S. RAHMSTORF (2012): A decade of weather extremes. In: *Nature Climate change*. DOI: 10.1038/nclimate1452
- DIN EN 752:2015-10, 2015: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement
- DWA (Hg.) (2012a): DWA-A 531 Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
- DWA (Hg.) (2012b): DWA-M 552 Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
- FIELD, C. B. (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press
- HABERLANDT, U. (2016): Ergebnisse eines Expertengesprächs zum Thema „Bemessungsniederschlag“. In: *KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft* 9 (6), S. 340–341
- KATZ, R.W., M.B. PARLANGE & P. NAVEAU (2002): Statistics of extremes in hydrology. In: *Advances in Water Resources* 25, S. 1287–1304
- MILLY, P.C.D., J. BETANCOURT, M. FALKENMARK, R.M. HIRSCH, Z.W. KUNDZEWICZ, D.P. LETTENMAIER, R.J. STOUFFER & J. RONALD (2008): Climate change. Stationarity is dead: whither water management? In: *Science (New York, N.Y.)* 319 (5863), S. 573–574. DOI: 10.1126/science.1151915
- MUDERSBACH, C. (2009): Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik. Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der Deutschen Nord- und Ostseeküste. Dissertation. Universität Siegen, Siegen
- MUDERSBACH, C. & J. JENSEN (2008): Zur Risikoermittlung in Küstenregionen mit probabilistischen Methoden - Ein Beitrag zur Beschreibung und Bewertung. In: *KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft* (5), S. 260–266
- MUDERSBACH, C. & J. JENSEN (2010): Non-stationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures at the German North Sea coastline. In: *Journal of Flood Risk Management* 3 (1), S. 52–62. DOI: 10.1111/j.1753-318X.2009.01054.x
- MUDERSBACH, C., T. WAHL, I.D. HAIGH & J. JENSEN (2013): Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. In: *Continental Shelf Research* 65, S. 111–120. DOI: 10.1016/j.csr.2013.06.016
- MUDERSBACH, C., J. BENDER & F. NETZEL (2015): An analysis of changes in flood quantiles at the gauge Neu Darchau (Elbe River) from 1875 to 2013. In: *Stoch Environ Res Risk Assess*. DOI: 10.1007/s00477-015-1173-7
- OBEYSEKERA, J. & J.D. SALAS (2014): Quantifying the Uncertainty of Design Floods under Nonstationary Conditions. In: *J. Hydrol. Eng.* 19 (7), S. 1438–1446. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000931
- OBEYSEKERA, J. & J.D. SALAS (2016): Frequency of Recurrent Extremes under Nonstationarity. In: *J. Hydrol. Eng.* 21 (5), S. 04016005. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001339
- PETROW, T. & MERZ, B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology*, 371(1), 129-141
- READ, L.K. & R.M. VOGEL (2015): Reliability, return periods, and risk under nonstationarity. In: *Water Resour. Res.* 51 (8), S. 6381–6398. DOI: 10.1002/2015WR017089
- READ, L.K. & R.M. VOGEL (2016): Hazard function theory for nonstationary natural hazards. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16 (4), S. 915–925. DOI: 10.5194/nhess-16-915-2016
- ROOTZÉN, H. & R.W. KATZ (2013): Design Life Level: Quantifying risk in a changing climate. In: *Water Resour. Res.* 49 (9), S. 5964–5972. DOI: 10.1002/wrcr.20425
- SALAS, J.D. & J. OBEYSEKERA (2014): Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events. In: *J. Hydrol. Eng.*, S. 130402173422002. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820
- SERINALDI, F. (2015): Dismissing return periods!. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29(4), 1179-1189
- SERINALDI, F. & C.G. KILSBY (2015): Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. In: *Advances in Water Resources* 77, S. 17–36. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.12.013
- VAN DEN BESSELAAR, E.J.M., A.M.G. KLEIN TANK & T.A. BUISSHAND (2012): Trends in European precipitation extremes over 1951-2010. In: *Int. J. Climatol*, S. n/a. DOI: 10.1002/joc.3619
- VASILIADES, L., P. GALIATSATOU, P. & A. LOUKAS (2015): Nonstationary Frequency Analysis of Annual Maximum Rainfall Using Climate Covariates. In: *Water Resour Manage* 29 (2), S. 339–358. DOI: 10.1007/s11269-014-0761-5
- WI, S., J.B. VALDÉS, S. STEINSCHNEIDER & T.W. KIM (2016): Non-stationary frequency analysis of extreme precipitation in South Korea using peaks-over-threshold and annual maxima. In: *Stoch Environ Res Risk Assess* 30 (2), S. 583–606. DOI: 10.1007/s00477-015-1180-8
- WITT, A., J. KURTHS, A. PIKOVSKY (1998): Testing stationarity in time series. In: *Physical Review E* 58 (2), S. 1800–1810