

# HOCHWASSER UND NIEDERSCHLAG IN DEUTSCHLAND: DIE NOTWENDIGKEIT VON LANGFRISTBEOBACHTUNGEN UNTER RÄUMLICHER HOCHAUFLÖSUNG

Manfred Mudelsee<sup>1,2</sup>  
Gerd Tetzlaff<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstraße 3, 04103 Leipzig  
E-mail: [mudelsee@uni-leipzig.de](mailto:mudelsee@uni-leipzig.de)

<sup>2</sup>Climate Risk Analysis, Wasserweg 2, 06114 Halle (S)

## 1. Einleitung

Blickt ein Laie in die Tageszeitungen, besucht Online-Nachrichtendienste, schaut in Webseiten von Umweltministerien, so befällt ihn oder sie die Vermutung, daß es katastrophal mit unserem Klimasystem stehe. „Die Wetterextreme nehmen zu“ ist eine häufige dort anzutreffende Mitteilung. Ein Klimawissenschaftler dagegen mag mit Achselzucken eine systematische Verzerrung (*only bad news are good news*) vermuten. Außerdem wird er oder sie Anstoß an der Mitteilung nehmen und sich fragen, was denn nun zunehme: die Stärke von Extremereignissen oder deren Häufigkeit.

Jedoch hat unabhängig von der Mediendarstellung das Thema „Wetterextreme“ hohe sozio-ökonomische Relevanz, wachsen ja die wirtschaftlichen Schäden in empirischen Beschreibungen im Potenzgesetz mit dem erreichten Maximalwert der Klimavariablen an (z. B. Emanuel, 2005): Die Schwänze der Verteilung verursachen die Schäden.

Die wissenschaftliche Hauptaufgabe besteht darin, das Risiko (Wahrscheinlichkeit) des Auftretens von Wetterextremwerten zu quantifizieren. Weil sich das Klima mit der Zeit ändert (Houghton et al., 2001), kann sich auch das Risiko ändern, und die Quantifizierungsmethoden müssen dieser Instationarität Rechnung tragen. Weil Daten fehlerbehaftet sind (Meß-, Proxy- und Datierungsfehler) und das Auftreten von Extremen ein stochastischer Prozeß, sind auch Risikoschätzungen fehlerbehaftet, und eine Abschätzung dieser Fehler ist unerlässlich. Weil das Wetter- und Klimageschehen eine hohe räumliche Variabilität aufweisen kann, sind derartige Schätzungen für das „Klimarisiko“ unter entsprechend hoher Auflösung vorzunehmen.

Unser Beitrag untersucht die Klimavariablen Abfluß und Niederschlag und das Potential, das Hochwasserrisiko in Deutschland in den vergangenen Jahrhunderten zu quantifizieren. Wir beschränken uns dabei vornehmlich auf eigene Untersuchungen. Es wird eine Risikoschätzmethode präsentiert, welche auch unter Instationarität Fehlerbänder erzeugen kann. Die Datensituation zeigt, daß es möglich ist, die Information in historischen Hochwasserdokumenten mit der von gemessenen Abflußzeitreihen zu kombinieren, um lange, räumlich differenzierte Hochwasserchronologien zu erstellen. Niederschlagszeitreihen gehen zwar weniger weit zurück, dies reicht jedoch häufig aus, um signifikante Trends im Risiko von Extremniederschlägen nachzuweisen.

## 2. Daten

### 2.1 Abflußzeitreihen

#### 2.1.1 Elbe

Die Elbe weist entlang ihres gesamten Laufes eine Reihe von Pegelstationen auf, von denen Abflußzeitreihen in Tagesauflösung zurück ins 19. Jahrhundert vorliegen (GRDC, 2006). Zu nennen sind Děčín (1887–1990), Dresden (1852–2001), Barby (1899–2001), Wittenberge (1899–2001) und Neu-Darchau (1874–2002). Die Pegelstation Turice am Nebenfluß Jizera (1910–1990) kann über das Abflußgeschehen im Bereich des Oberlaufes informieren. Abfluß wird über den Wasserstand gemessen; die über Jahrzehnte hinweg vorzunehmende Aktualisierung der Abfluß–Wasserstands-Eichkurven ist deshalb wichtig für die Datengenauigkeit. Neben dem herausragenden Rang der Reihe „Dresden“ bieten auch viele der anderen Stationen gute Genauigkeit (Helms et al., 2002). Der Anschluß des GRDC-Datenintervalls bis heute ist mit Hilfe von Wasserbaubehörden/Online-Quellen möglich.

### **2.1.2 Oder**

Die Situation an der Oder ist deutlich schlechter im Vergleich zur Elbe. Die längste zur Verfügung stehende Abflußzeitreihe ist von Eisenhüttenstadt (1920–2000), die zudem im ersten Halbjahr 1945 eine Datenlücke aufweist. Nennenswert ist noch Hohensaaten-Finow (1920–2000), ebenfalls in Tagesauflösung. Polnische Stationen weisen anscheinend lediglich Monatsauflösung auf.

### **2.1.3 Weser/Werra**

Die Weser verfügt über vier ausgezeichnete lange, fast lückenlos vorliegende Tageszeitreihen: Hann. Münden (1831–2000), Bodenwerder (1839–2000), Vlotho (1820–2000) und Intschede (1857–2002). Neben diesen Daten vom Global Runoff Data Centre (GRDC) verfügen wir über Tagesabflußwerte der Werra bei Meiningen (1918–2003) (Staatlichen Umweltamt Suhl). Weser und Werra gestatten deshalb Analysen ihres Hochwassergeschehens vom Ober- bis zum Unterlauf.

### **2.1.4 Main**

Vom Main gibt es (GRDC) lediglich zwei Stationen mit bis ins 19. Jahrhundert gehenden, lückenlosen Tagesabflußwerten: Schweinfurt (1844–2000) und Würzburg (1823–2002). Da die beiden Stationen mit 12715 km<sup>2</sup> bzw. 14031 km<sup>2</sup> in ihrer Einzugsgebietsgröße nahe beieinander liegen, ist es schwierig, Variationen des Hochwasserverhaltens entlang des Flusses zu quantifizieren.

### **2.1.5 Andere Flüsse**

Von weiteren teils deutschen Flüssen bietet in erster Linie der Rhein gute Voraussetzungen zu Langfristanalysen. Die Entwicklung und Nutzbarmachung einer breiten Datenbasis von langen Aufzeichnungen für kleinere Flüsse steht aus. Dennoch erscheint die nutzbare Datenbasis für den deutschen Raum besser (mehr Stationen, längere Zeitintervalle) als für viele andere Länder Europas.

## **2.2 Niederschlagszeitreihen**

Hulme et al. (1998) kompilierten globale Niederschlagsbeobachtungen in eine homogenisierte Datenbasis aus Gridboxen (2.5° Breite x 3.75° Länge) und Monatsauflösung für den Zeitraum 1900–1998. Diese Zeitaufklärung beschränkt Risikoanalysen extremer Niederschläge. Es gibt vereinzelte Beobachtungsreihen in Tagesauflösung zurück bis ins 19. Jahrhundert bei guten Homogenitätseigenschaften (z. B. Potsdam, Zeitbereich 1893–2005). Jedoch steht eine zugreifbare Datenbasis aus, die entsprechende Qualität mit hoher Raumaufklärung verbindet.

## **2.3 Historische Hochwasserdokumente**

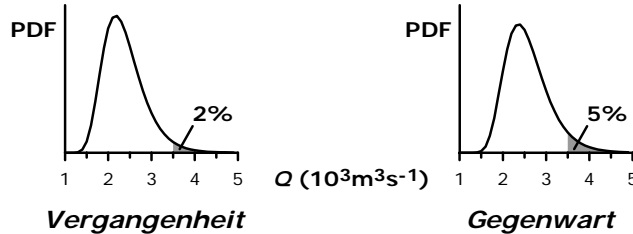
Historische Dokumente sind unverzichtbar, um Hochwasserereignisse vor der instrumentellen Periode historisch-kritisch arbeitend zu rekonstruieren (Brázdil et al., 2005). Die Hauptfehlerquelle sind durch Dokumentenverlust (genauer: durch dessen Zeitabhängigkeit) verursacht: Dateninhomogenität. Die Texte zur Hydrographie von Curt Weikinn (Weikinn, 1958–2002) sind allem Anschein nach die bisher einzigen vollständig veröffentlichten Quellen. Zudem gibt es eine Online-Ausgabe der Funde einer Habilitationsschrift (Militzer, 1998) für den Zeitraum 1500–1799. Überlappungszeiträume (instrumentelle/historische Beobachtungen) gestatten die Kalibrierung und die Erzeugung langer, homogener Reihen (Mudelsee et al., 2003).

## **2.4 Historische Niederschlagsbeobachtungen**

Nur vereinzelte, starke Niederschlagsereignisse können anhand historischen Materials einer Quantifizierung näher gebracht werden. Beispiele sind die Regenfälle im Zusammenhang mit der „Jahrtausendflut“ im Juli 1342 (Tetzlaff et al., 2002) oder die Ereignisse im Jahr ohne Sommer, 1816 (Börngen et al., 2002). Die Anfänge von Niederschlagsmessungen werden im Vergleich mit historischen Beobachtungen dargestellt von Pleiß (1955–1956) oder Witte (1991). Das Buch von Glaser (1991) enthält zahlreiche Hinweise zur Klimageschichte Mitteleuropas und Deutschlands — leider allerdings fast keine Originalquellen.

### 3. Methode

Eine vollständige Information über das gesamte Abflußverhalten wäre durch die zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) gegeben. Da deren Schätzung vor unüberwindbare Hindernisse in Bezug auf die Datensituation über die Vergangenheit stöße, genügt es in der Praxis, die zeitabhängige Übertretenswahrscheinlichkeit (Abb. 1) bei einem geeignet gewählten Schwellenwert zu bestimmen bzw. die zeitabhängige Auftretensrate (Risiko pro Zeiteinheit),  $\lambda(t)$ .



**Abbildung 1.** Zeitabhängige PDF. Hypothetisches Beispiel: Abfluß,  $Q$ , der Elbe bei Dresden; Schwellenwert =  $3500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ; Bezugszeitraum = 1 Jahr, d. h.:  $\lambda(\text{Vergangenheit}) = 0.02 \text{ a}^{-1}$ ,  $\lambda(\text{Gegenwart}) = 0.05 \text{ a}^{-1}$ .

#### 3.1 Kernschätzung

Man kann einerseits ein parametrisches Modell für  $\lambda(t)$  annehmen und die Modellparameter mit Hilfe der Daten schätzen; Frei und Schär (2001) führten so das logistische Modell zur Klimarisikoschätzung ein. Mudelsee et al. (2003) andererseits verwendeten eine nichtparametrische Schätzung mit Hilfe von Kernfunktionen:

$$\hat{\lambda}(t) = h^{-1} \sum_i K([t - T(i)]/h),$$

worin der „Hut“ die Schätzung anzeigt,  $t$  die Zeit,  $h$  die Bandbreite,  $K$  die Gaußsche Kernfunktion und  $T$  die Hochwasserzeitpunkte (Schwellenwertüberschreitung bzw. historisch übermitteltes Datum); der Summationsindex  $i$  läuft von 1 bis  $n$  (Anzahl der Ereignisse). Details und Literaturangaben zur Kernschätzung, Bandbreitenwahl (Glättungsproblem) und Randeffektunterdrückung geben Mudelsee et al. (2004). Der Vorteil der nichtparametrischen Schätzung wird deutlich bei langen Beobachtungszeiträumen, für die parametrische Modelle wie das monotone logistische zu restriktiv sind.

#### 3.2 Bootstrap-Konfidenzbänder

Jede statistische Schätzung einer realen Größe (wie  $\lambda(t)$ ) weist Schätzungenauigkeiten auf, ohne Kenntnis derer Größe eine wissenschaftliche Beurteilung und rationale Handlungsweise unmöglich sind. Gerade bei Klimazeitreihen mit ihren notorisch schwierigen Dateneigenschaften (rechtsschiefe Verteilungen, Nichtäquidistanz, Persistenz) bietet der *bootstrap* (Efron und Tibshirani, 1993) eine Möglichkeit der Fehlerquantifizierung ohne allzu simplifizierende Annahmen (wie die Annahme „Normalverteilung“). Die Konstruktion eines Fehlerbandes um  $\hat{\lambda}(t)$  mit Hilfe des *bootstrap* wurde von Cowling et al. (1996) entwickelt. Das Prinzip ist, eine hohe Anzahl (etwa 2000) von simulierten Hochwasserzeitreihen  $\{T^*(i)\}_{i=1, \dots, n}$  durch Ziehen mit Zurücklegen aus  $\{T(i)\}_{i=1, \dots, n}$  zu erzeugen und daraus ebenso viele simulierte Schätzungen,  $\hat{\lambda}^*(t)$ . Die zentralen 90 % der  $\hat{\lambda}^*(t)$  ergeben ein Perzentil-Konfidenzband; besser jedoch ist die Verwendung eines sogenannten Perzentil- $t$ -Bandes (Cowling et al., 1996) mit kleineren Fehlern. Siehe die Originalarbeit und Mudelsee et al. (2002, 2004).

### 4. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Hochwasserchronologien von Elbe und Oder über die letzten 800–1000 Jahre wurden von Mudelsee et al. (2003) konstruiert und veröffentlicht. Inhomogenität durch Dokumentenverlust ist für beide Flüsse für den Zeitraum nach 1500 vernachlässigbar. Mudelsee et al. (2003) schätzten Risikokurven extremer Elbe- und Oderhochwasser; diese dokumentieren keinen Anstieg (Sommerhochwasser) bzw. einen Abfall (Winter) für das 20. Jahrhundert. Ursache des Abwärtrends im Winter ist wahrscheinlich das seltenere Auftreten von starken Eisdecken, die im Frühjahr aufbrechen und hohe Wasserstände deutlich verstärken können. Ursache der geringeren Flußvereisungen ist nicht erhöhte Verschmutzung, sondern regionale Erwärmung (Mudelsee et al., 2004). Die Trends für das 20. Jahrhundert sind in ungefähre Übereinstimmung mit den Trends des Risikos des Überschreitens des 25-jährigen Maximums der Niederschlagszeitreihen (Hulme et al., 1998) in den Einzugsgebieten.

Eine Hochwasserchronologie für die Werra (1500–2003) und entsprechende Risikoschätzungen werden von Mudelsee et al. (2006) präsentiert. Seit 1760 nimmt das Sommerhochwasserrisiko der

Werra ab; das Winterhochwasserrisiko zeigt signifikante Schwankungen und einen Aufwärtstrend für das 20. Jahrhundert.

Der Schluß (Houghton et al., 2001), eine erhöhte regionale Temperatur bewirke „automatisch“ eine Erhöhung des Hochwasserrisikos (Clausius–Clapeyron-Gleichung), ist zu einfach. Er berücksichtigt nicht, daß sich mit der Temperatur weitere Risikofaktoren ändern können, etwa die statistische Verteilung der Anströmrichtung von orographischen Hindernissen.

Zusammengefaßt weisen die teilweise gegenläufigen Trends auf die hohe räumliche Variabilität von Niederschlags- und Abflußgeschehen (Orographie) hin. So banal es klingt: die Elbe ist nicht die Oder. Nur räumlich hochdifferenzierte Analysen von langen Zeitreihen haben deshalb eine Chance, die entsprechende Variabilität zu erfassen.

Wir danken: M. Börngen, R. Brázdil, M. Deutsch, Z. Kundzewicz, J. Luterbacher, J. Munzar, C. Pfister und H. Wanner für Diskussionen; dem Global Runoff Data Centre (Koblenz) und T. Maurer für Auskünfte und die Bereitstellung zahlreicher Daten; ebenso dem Staatlichen Umweltamt Suhl (B. Kowalski) sowie mehreren Thüringer Archiven; sowie der DFG für finanzielle Unterstützung.

## Literaturverzeichnis

- Börngen, M., G. Tetzlaff, and M. Mudelsee, 2002: Zu den Niederschlags- und Abflussverhältnissen in Europa im Jahr 1816, dem „Jahr ohne Sommer“. *Sci. Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig*, **26**, 73–80.
- Brázdil, R., C. Pfister, H. Wanner, H. von Storch, and J. Luterbacher, 2005: Historical climatology in Europe—the state of the art. *Clim. Change*, **70**, 363–430.
- Cowling, A., P. Hall, and M.J. Phillips, 1996: Bootstrap confidence regions for the intensity of a Poisson point process. *J. Am. Stat. Assoc.*, **91**, 1516–1524.
- Efron, B., and R.J. Tibshirani, 1993: *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall, London, 436 S.
- Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686–688.
- Frei, C., and C. Schär, 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Climate*, **14**, 1568–1584.
- Glaser, R., 2001: *Klimageschichte Mitteleuropas*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 227 S.
- GRDC, 2006 *Global Runoff Data Centre Station Catalogue*, <http://grdc.bafg.de/servlet/is/910>. BfG, Koblenz.
- Helms, M., J. Ihringer, and F. Nestmann, 2002: Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe, in *Morphodynamik der Elbe* (Nestmann, F., and B. Büchele, Eds.). Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), S. 91–202.
- Houghton, J.T., et al., Eds., 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 881 S. [<http://www.ipcc.ch/>]
- Hulme, M., T.J. Osborn, and T.C. Johns, 1998: Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3379–3382.
- Militzer, S., 1998: *Klima, Umwelt, Mensch (1500–1800): Studien und Quellen zur Bedeutung von Klima und Witterung in der vorindustriellen Gesellschaft*. Historisches Seminar, Univ. Leipzig, 1971 S. [<http://mitglied.lycos.de/mili04/>]
- Mudelsee, M., M. Börngen, G. Tetzlaff, and W. Feck-Yao, 2002: Towards predicting catastrophic flood events: An analysis of historical data of rivers Elbe and Oder, in *Zweites Forum Katastrophenvorsorge — Folgen, Vorsorge, Werkzeuge* (Tetzlaff, G., T. Trautmann, and K.S. Radtke, Eds.), DKKV, Bonn, S. 103–111. [<http://www.climate-risk-analysis.com/>]
- Mudelsee, M., M. Börngen, G. Tetzlaff, and U. Grünewald, 2003: No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, **425**, 166–169. [<http://www.climate-risk-analysis.com/>]
- Mudelsee, M., M. Börngen, G. Tetzlaff, and U. Grünewald, 2004: Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb”. *J. Geophys. Res.*, **109**, D23101 (doi:10.1029/2004JD005034). [<http://www.climate-risk-analysis.com/>]
- Mudelsee M, Deutsch M, Börngen M, Tetzlaff G (2006) Trends in flood risk of the River Werra (Germany) over the past 500 years. *Hydrol. Sci. J.*, **51** (im Druck). [<http://www.climate-risk-analysis.com/>]
- Pleiß, H., 1955–1956: Die ersten wetterkundlichen Beobachtungen in Sachsen und die Verdienste Wilhelm Gott-helf Lohrmanns um die Meteorologie. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Dresden*, **5**, 927–940.
- Tetzlaff, G., M. Börngen, M. Mudelsee, and A. Raabe, 2002: Das Jahrtausendhochwasser von 1342 am Main aus meteorologisch-hydrologischer Sicht. *Wasser und Boden*, **54**(10), 41–49.
- Weikinn, C., 1958–2002: *Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitwende bis zum Jahre 1850: Hydrographie*. Teile 1–4, Akademie-Verlag, Berlin, 1984 S., Teile 5–6 (Börngen, M. und G. Tetzlaff, Eds.), Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1402 S.
- Witte, W., 1991: Der Aussagewert von historischen hydrologischen Daten im Vergleich zu meteorologischen und (para-)phänologischen Daten für die Rekonstruktion der Witterung im Mittelrheingebiet seit dem 14. Jahrhundert. *Würzb. Geogr. Arb.*, **80**, 149–181.