

Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen ¹

„Kurzfassung“ ²

Diese Studie wurde durch die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) finanziell gefördert und von Dr.rer.nat. *Winfried Willems* & Dr. *Thomas Dick* am Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn erarbeitet. Fachlich begleitet wurden die Arbeiten von den Mitgliedern der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe HW-3.2 „Hochwasser“ im ATV-DVWK-Fachausschuss HW-3 „Wasserbewirtschaftung“ und des früheren DVWK-Fachausschusses „Extreme Abflüsse“. Dies sind im Einzelnen:

Dr.-Ing. *Markus Disse*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Prof. Dr.-Ing. *Hans-B. Kleeberg*, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
Dr.-Ing. *Wolfgang Kron*, Münchner Rückversicherungsgesellschaft, München
Dipl.-Ing. *Franz-Klemens Holle*, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
Prof. Dr.-Ing. *Ulrich Maniak*, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. *Günther Meon*, Universität - GH Paderborn, Abt. Höxter, Höxter (Sprecher)
Prof. Dr. *Gerd Morgenschweis*, Ruhrverband, Essen
Prof. Dr.-Ing. *Heribert Nacken*, Ingenieurgesellschaft Dr.-Ing. Nacken mbH, Heinsberg
Dr.-Ing. *Karl-Heinz Rother*, Landesamt für Umwelt und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz
Prof. Dr. *Andreas Schumann*, Ruhr-Universität Bochum, Bochum
Dipl.-Hydrol. *Hans-Georg Spanknebel*, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt
Prof. Dr.-Ing. *Frank Tönsmann*, Universität Kassel, Kassel

1 Vorbemerkung

Wie stark der Mensch durch Eingriffe in die Landschaft auch die Hochwasser verschärft, wird nach größeren Ereignissen immer wieder diskutiert. Die Tatsache, dass der Mensch die Hochwasserverhältnisse negativ beeinflussen kann, wird nicht bestritten, aber über deren Größenordnungen bestehen unterschiedliche Ansichten.

Die vorliegende Studie leistet einen Beitrag dazu, die Wirkungen in Abhängigkeit von der Intensität möglicher Eingriffe und maßgeblicher Randbedingungen zu quantifizieren. Sie unterscheidet sich grundsätzlich von vielen anderen Untersuchungen zur Folge menschlicher Aktivitäten auf das Hochwassergeschehen. Während bisher immer Fallstudien für reale Einzugsgebiete durchgeführt worden sind, deren Allgemeingültigkeit in der Regel offen bleibt, wird hier die Übertragbarkeit erreicht, in dem für annähernd vierzigtausend unterschiedliche Größen von Eingriffen und Randbedingungen (z. B. Einzugsgebietsgröße, Gefälleverhältnisse, Niederschlagshöhe) die Wirkungen berechnet und letztlich überschaubar statistisch zusammengefasst werden.

¹ Anregungen zu diesem Arbeitsbericht sind erwünscht. Richten Sie diese bitte an die ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle, Abteilung Wasserwirtschaft, Abfall und Boden, Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef.

² Auf Grund des großen Umfangs kann der Arbeitsbericht an dieser Stelle nicht vollständig abgedruckt werden.

2 Veranlassung und Ziel

Bei der Diskussion über die großen Hochwasserereignisse von Dezember 1993, April 1994, Januar 1995, September 1977, Pfingsten 1999 und August 2002 an Rhein, Oder, Donau, Elbe und ihren Nebenflüssen sind erhebliche Missverständnisse über die Ursachen der Hochwasser erkennbar geworden. Eine vermeintliche Verschärfung der Häufigkeiten und Größen der Hochwasserereignisse werden häufig durch menschliche Eingriffe begründet. Angeprangert werden vor allem die direkten Eingriffe in den Vorgang der Abflussbildung und Abflusskonzentration (z. B. Versiegelung und Landnutzungsveränderungen) sowie in den Vorgang der Wellenverformung im Gewässer (z. B. Wegnahme von Retentionsräumen, Gewässerausbau, Eindeichungen und Uferbefestigungen).

Obwohl der Einfluss des Menschen auf Hochwasser in großen Einzugsgebieten und bei großen Abflüssen vergleichsweise gering ist (bei extremen Ereignissen, die die Bemessungshochwasser übersteigen, geht er gegen Null, sofern nicht der Talquerschnitt erheblich verändert worden ist), kann er in kleinen Gebieten und bei kleineren Hochwassern sehr erheblich sein. Quantitative Aussagen über die Wirkung anthropogener Eingriffe auf den Hochwasserabfluss in Abhängigkeit der Einzugsgebietseigenschaften und der meteorologischen Bedingungen können jedoch mangels systematisch durchgeführter Untersuchungen nicht getroffen werden. Darüber hinaus ist nicht bekannt, ob, und wenn ja, in welchem Ausmaß sich die hochwasserrelevanten Wirkungen menschlicher Eingriffe gegenseitig beeinflussen und Überlagerungseffekte erzeugen können.

Ziel des Gesamtprojektes „Ursache-Wirkungs-Katalog (IsHuw)“ ist es, **repräsentative Aussagen anzustreben, die über die individuellen Bedingungen in realen Einzugsgebieten und Gerinnen, des meteorologischen Systemantriebs sowie der menschlichen Eingriffe hinweg gültig und von konkreten Fallstudien unabhängig sind**. Auf diese Weise sollen Wirkungen vielfältiger anthropogener, auch großräumiger Maßnahmen quantitativ abgeschätzt werden können, bevor zeit- und kostenaufwendige individuelle Detailuntersuchungen erfolgen. Es ist nicht vorgesehen, eine neue Fallstudie neben die zahlreichen bereits vorhandenen zu stellen, sondern vielmehr allgemeingültige und übertragbare Aussagen aufzustellen.

Exakter lässt sich das Ziel wie folgt formulieren: Es ist der Einfluss der **Änderung** von Gebiets-, Gerinne- und Ereignismerkmalen (Ursachen) auf die **Änderung** der Merkmale von Hochwasserereignissen bestimmter Jährlichkeit T (Wirkungen) zu quantifizieren, so dass im Ergebnis die Änderungen von Hochwasserscheitel, -fülle und -anstiegszeit in möglichst allgemeingültiger und pauschaler Form quantifiziert werden können. Der Einfluss etwaiger langfristiger Änderungen von Ereignismerkmalen (etwa als Folge einer Klimaänderung) ist nicht Bestandteil der Untersuchung.

Als anthropogene Maßnahmen werden dabei folgende hochwasserrelevanten Eingriffe **in der Fläche betrachtet**:

- Versiegelung,
- Entwaldung,
- Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzung und Flurbereinigung (z. B. Umwandlung von Grünland zu Ackerflächen)

wobei die Auswirkungen dieser Maßnahmen, also die **Änderungen** von Hochwasserscheitel, -volumen und anstiegszeit in Abhängigkeit gebiets- und ereignisspezifischer Merkmale untersucht werden.

Zu hochwasserrelevanten Eingriffen in Gewässer und Aue ist im September 1999 eine durch die LAWa finanzierte Studie von Prof. Koehler mit dem Titel „Hochwasserschutz durch natürliche und künstliche Retention“ vorgelegt worden. Bei der Planung des Informationssystems IsHuw wurde deshalb davon ausgegangen, dass die

Untersuchungen zu den Wirkungen von Eingriffen in Gewässer und Aue wegen des Vorliegens dieser Studie zurückgestellt werden können.

Nachdem in der **Pilotphase** (1997) im Rahmen einer Literaturstudie vorhandene Untersuchungen, Studien und Forschungsergebnisse auf ihre Allgemeingültigkeit geprüft und bewertet wurden und darauf aufbauend eine Gesamtmethodik für die Durchführung der weitergehenden Untersuchungen vorgelegt wurde (KLEEBERG et al., 1997), werden in dieser **Hauptphase** (1999 - 2001) Abflussveränderungen systematisch untersucht und Möglichkeiten der Verallgemeinerung der Ergebnisse für beliebige Belastungen und Randbedingungen, die die Gesamtheit der Realitäten repräsentieren, gesucht.

Um diese generellen Aussagen treffen zu können, müssen zu den konkreten Einzugsgebieten (Fallbeispiele) zusätzlich synthetisch generierte hinzukommen, bei denen ausgewählte Einzugsgebiets- und Flussnetzmerkmale in plausiblen Spannbreiten variiert werden. Diese unterschiedlichen Randbedingungen ausschließlich aufgrund von realen Fallbeispielen zu erhalten, scheidet schon allein wegen des hohen Aufwandes bei der Datenakquisition aus. Für die realen und die synthetisch generierten Einzugsgebiete werden zahlreiche Modellrechnungen durchgeführt, so dass die Wirkungen aller oben genannten Eingriffe auf die Hochwasserabflüsse simuliert werden können. Die Ergebnisse werden im Anschluss daran mit nachgeschalteten multivariaten statistischen Methoden weiterverarbeitet. Auf diese Weise werden letztlich statistische Zusammenhänge erarbeitet, die die Vorhersage der Auswirkungen von Veränderungen in der Fläche und im Gewässer auf die Veränderungen von Hochwasserabflüssen erlauben, ohne dass in jedem Einzelfall komplizierte und umfangreiche Modellrechnungen erforderlich sind.

Die Ergebnisse haben unmittelbar praktischen Wert:

a) als Instrument, das im Vollzug nützlich ist, etwa beim

- Begründen von strategischen Entscheidungen
- Beantworten von Anfragen aus Politik, Öffentlichkeit und Verbänden
- Erstellen von Aktionsplänen

b) als Instrument, das in der Planungspraxis eingesetzt wird, zum Beispiel zum

- Abschätzen möglicher Handlungsalternativen
- Belegen von Argumenten für oder wider bestimmte Maßnahmen
- Ursachennachweis bereits eingetretener Wirkungen

3 Lösungsweg, Arbeitskonzept und Arbeitsschritte

In der Pilotstudie wurde anhand des Testeinzugsgebietes „Gebenbach“ vorgestellt, wie Änderungen von Merkmalen einer Hochwasserwelle (Scheitel, Volumen, Anstiegszeit) bei Änderung von Gebiets- (Gerinne-) und Ereignismerkmalen mit Hilfe des physikalisch begründeten hydrologischen Modells ASGi abgeschätzt werden kann. Verfolgt man das Ziel, verallgemeinernde Aussagen zu treffen, so ist dies nur möglich nach hydrologischer Modellierung einer großen Zahl von Einzugsgebieten unterschiedlichster naturgeographischer Ausstattung. Prinzipiell wäre die physikalisch begründete Modellierung auch in dieser Situation möglich und wünschenswert. Sie scheitert jedoch an dem in der verfügbaren Zeit nicht zu bewältigenden Aufwand hinsichtlich Datenbeschaffung, Modellkalibrierung und -validierung, insbesondere aber an dem schwierigen Problem der „dreidimensionalen“ Generierung von Einzugsgebieten mit allen hydrologisch relevanten Gebietsmerkmalen in einer räumlichen Verteilung und Korrelationsstruktur, wie es unter realen Bedingungen möglich wäre. Auf der anderen Seite sind

prinzipiell auch konzeptionelle, kalibrierungsfreie Niederschlag-Abfluss- und Flussgebietsmodelle zur Schätzung von Hochwasserabflusswellen an unbeobachteten Punkten in der Lage und stellen insofern eine Lösung des hier vorliegenden Problems dar, denn auch diese erlauben szenarienartige Abschätzungen der Auswirkungen von veränderten Gebietsmerkmalen. Dabei handelt es sich insbesondere um Teilmodule zur ausschließlichen von Gebiets- und Ereignismerkmalen abhängigen Berechnung von

- Effektivniederschlag,
- Direktabfluss und
- Wellenverformung.

Der wesentliche Vorteil dieser Modellform gegenüber den physikalisch begründeten Modellen besteht im Hinblick auf die hier vorliegende Fragestellung insbesondere darin, dass die zur Beschreibung eines Einzugsgebietes notwendigen Daten um ein Vielfaches geringer sind, so dass sich die synthetische Erzeugung derartiger Gebiete erheblich einfacher gestaltet. Problematisch bei diesen Modellen ist, dass aufgrund der „konzeptionellen Behandlung“ physikalischer Prozesse zunächst unklar ist, inwieweit berechnete Modellergebnisse zu Hochwassermerkmalsänderungen den real zu erwartenden tatsächlich auch entsprechen. Um diese Unklarheit zu mindern, wird hier vorgeschlagen, die Modellplausibilität eines konzeptionellen Modells anhand der Ergebnisse eines physikalisch begründeten Modells zu validieren. Kriterium ist dabei, inwieweit die vom physikalisch begründeten Modell nachgewiesenen Änderungen von Hochwassermerkmalen bei geänderten Rahmenbedingungen vom konzeptionellen Modell in vergleichbarer Güte nachgebildet werden. Dabei ist prinzipiell vorstellbar, dass das konzeptionelle Modell bei bestimmten Ursache-Wirkungs-Beziehungen in hinreichender Genauigkeit arbeitet, bei anderen hingegen nicht. Die Aufstellung des Experimentierplanes, also die Festlegung, welche Ursachen (z. B. Landnutzungsänderungen) im Rahmen dieser Studie untersucht werden können, muss sich an den Ergebnissen des Modellvergleiches orientieren.

Unter Berücksichtigung dieser Vorüberlegungen und der Maßgabe, dass eine weitere Verallgemeinerung der Ergebnisse des konzeptionellen Modells angestrebt wird, resultiert die folgende Arbeitsstrategie hinsichtlich der durchzuführenden hydrologischen Modellierungen auf drei Abstraktionsstufen:

Abstraktionsstufe 1:

Physikalisch begründete hydrologische Modellierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge eines realen Einzugsgebietes als Grundlage zur Überprüfung der Modellierungen in der Abstraktionsstufe 2.

Abstraktionsstufe 2:

Konzeptionelle hydrologische Modellierung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge als Grundlage für die Aufstellung des Modells der Abstraktionsstufe 3, sofern die Modellüberprüfungen anhand der Modellierungsergebnisse der Abstraktionsstufe 1 dies als durchführbar erscheinen lassen.

Abstraktionsstufe 3:

Multivariate statistische Modellierung zur Ableitung allgemeingültiger Ursache-Wirkungs-Beziehungen auf Grundlage der Modellierungsergebnisse der Abstraktionsstufe 2.

4 Zusammenfassung

Die Behauptung, extreme Hochwasser seien menschengemacht, muss die Fachwelt mit allgemeinen, aber zahlenmäßig nachweisbaren Fakten stützen oder widerlegen. Dazu bedarf es repräsentativer Aussagen, die über die individuellen Bedingungen der realen Einzugsgebiete hinweg gültig sind. Dies wird möglich, wenn man eine

Vielzahl möglicher Randbedingungen synthetisiert und mögliche anthropogen Eingriffe vornimmt und die resultierenden Hochwasserveränderungen statistisch analysiert. Der Aufwand dazu ist hoch. Es bedarf dabei

- geeigneter Generierungsmodelle für Flussgebiete,
- geeigneter Niederschlag-Abfluss-Modelle sowie
- eines geeigneten statistischen Modells zur Ermittlung der charakteristischen Abhängigkeiten.

Vorausgesetzt wird dabei, dass die heute üblichen hydrologischen Modelle prozesstreu sind, das heißt, dass das von ihnen mit hohem Abstraktionsgrad mathematisch nachvollzogene Verhalten der Wasserflüsse richtig wiedergegeben wird.

Dieser Bericht beschreibt angewandte Methoden und erzielte Ergebnisse bei der Umsetzung dieser Strategie. Er behandelt die Ableitung allgemeingültiger quantitativer Aussagen hinsichtlich der Veränderung von Hochwassermerkmalen aufgrund der Veränderungen von Einzugsgebietsmerkmalen. Es werden eine Vielzahl synthetischer Flussgebiete erzeugt und ihre veränderlichen Gebietsmerkmale (Landnutzungsverteilung) systematisch variiert. Die Wirkung dieser Variationen auf den Hochwasserscheitelabfluss werden durch hydrologische Modellierung nachgewiesen. Als hydrologisches Modell wird ein Modell aus der Klasse der konzeptionellen Modelle (Abstraktionsstufe 2) verwendet. Dessen Anwendbarkeit wird durch Vergleich mit Berechnungsergebnissen eines physikalisch begründeten Modells (Abstraktionsstufe 1) überprüft. Die Ergebnisse des konzeptionellen Modells werden durch ein statistisches Modell (Abstraktionsstufe 3) weiterverarbeitet, um so zu den allgemeingültigen Aussagen zu kommen.

Das konzeptionelle hydrologische Modell der Abstraktionsstufe 2 besteht aus weithin anerkannten Einzelbausteinen zur Nachbildung von Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenverformung. Dabei wird – basierend auf einem Modellansatz von MESA / MIFFLIN (1986) - die Flussnetzstruktur (und damit die Retentionswirkung der Gewässer) hochdetailliert in Form von Flussnetzweitenfunktionen im Modell berücksichtigt, so dass eine Anwendung des Modells von kleinen bis hin zu großen Flussgebieten möglich wird.

Die synthetischen Flussgebiete werden in einer Weise erzeugt, dass die für eine größere Zahl von bayerischen Einzugsgebieten ermittelten statistischen Momente und Kreuzkorrelationen aller relevanten Gebietsmerkmale erhalten bleiben. Die „quasisynthetischen“ Flussnetzweitenfunktionen werden aus einem großen Pool realer Weitfunktionen des topologisch bereinigten ATKIS25-Flussnetzes von Bayern zufällig gezogen.

Das statistische Modell der Abstraktionsstufe 3 stellt eine in den Parametern lineare multiple Regressionsgleichung dar, mit dessen Hilfe die Veränderungen des Abflussscheitels bei veränderten Landnutzungsverteilungen quantifiziert werden können. Die Ergebnisse dieses Modells stehen in Übereinstimmung mit den bisher bekannten, qualitativen Aussagen, wobei nun eine generalisierte, quantitative Abschätzung der Scheiteländerung möglich ist.

Zur leichteren Anwendbarkeit und Verbreitung des Modells der Abstraktionsstufe 3 wurde eine Internetseite bereitgestellt, die die interaktive Berechnung von Abflussscheiteländerungen auf der Grundlage der ermittelten Regressionsparameter erlaubt.

Literatur

DWVK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten; Teil II Synthese. DWVK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 113, Bonn.

KLEEBERG, H.-B. UND OVERLAND, H. (1989): Zur Berechnung des effektiven oder abflußwirksamen Niederschlags. Institut für Wasserwesen Mitteilung Heft 32/1990. Universität der Bundeswehr München.

MESA, O.J. AND MIFFLIN, E.R. (1986): On the relative role of Hillslope and Network Geometry in Hydrologic Response. In: Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I. and Wood, E. F. (ed.): Scale problems in Hydrology.

ATV-DVWK-Arbeitsbericht HW-3.2 „Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen“, 64 Seiten, 27 Bilder, 16 Tabellen, DIN A 4, August 2003, Einzelpreis 30,00 EUR, ISBN 3-942063-67-2.

*Zu beziehen bei : ATV-DVWK-Vertrieb, Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef,
Tel. 02242 / 872-120, Fax 022 42 / 872-100,
e-mail: vertrieb@atv.de, Internett: www.atv-dvwk.de*

Dipl.-Geogr. Georg Schrenk
Leiter der Abteilung Wasserwirtschaft, Abfall und Boden
ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef
Tel. 022 42 / 872-210, Fax 022 42 / 872-135