

Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten

Extended information basis for the determination of flood probabilities

von Ralf Merz und Günter Blöschl

Das traditionelle Verfahren zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten beruht auf einer rein statistischen Auswertung von beobachteten Hochwasserscheiteln, während das umfangreiche Wissen der Ingenieurhydrologie über Prozesse und Zusammenhänge der Hochwasserentstehung bei der Berechnung nicht berücksichtigt wird. In diesem Beitrag wird eine Vorgangsweise vorgestellt, dieses zu nützen, um die Hochwasserwahrscheinlichkeiten zuverlässiger zu bestimmen. Grundidee des Verfahrens ist es, die Informationsbasis systematisch über die Hochwasserstatistik hinaus zu erweitern, um möglichst viele Aspekte der Hochwasserentstehung zu erfassen. Die Informationserweiterung kann in drei Typen unterschieden werden: zeitlich, räumlich und kausal. Die Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten für einen Flussquerschnitt erfolgt dann durch eine Kombination der traditionellen Hochwasserstatistik mit der erweiterten Information, geleitet durch das hydrologische Verständnis über die dominanten Prozesse im jeweiligen Gebiet. Das vorgestellte Konzept wird anhand von Beispielen aus Österreich dargestellt.

Schlagwörter: Erweiterung der Informationsbasis, Hochwasserentstehung, Hochwasserwahrscheinlichkeit

The traditional method used to determine the probabilities of flood events relies on a purely statistical evaluation of observed flood peaks, disregarding the broad hydrological knowledge of flood processes and their interactions. This paper presents an approach which uses this hydrological knowledge to achieve more reliable flood estimations. The fundamental idea is to widen the information basis systematically beyond the scope of flood statistics and to cover as many aspects of flood generation as possible. Three types of extension may be distinguished here: temporal, spatial, causal. The flood probabilities of a given river cross-section are then determined through a combination of conventional flood statistics with the extended information derived from the hydrological understanding of dominant processes in the catchment. The new approach is illustrated with examples from Austria.

Keywords: Extended information, flood probability, flood process

1 Einleitung

Die letzten Extremhochwässer in Deutschland und Österreich, insbesondere die Ereignisse 2002 und 2005, waren die Auslöser einer Reihe von Initiativen zur Hochwasserberechnung, -vorhersage und Risikovorsorge. Dies führte auch wieder zu einer verstärkten Diskussion der Methoden zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Es ist interessant, dass die Bestimmung von Hochwasserdurchflüssen mit vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit bisher immer durch die statistische Auswertung von Hochwasserscheiteldurchflüssen geprägt war. Emil Julius Gumbel, der die Hochwasserstatistik mitbegründete, war Anfang der dreißiger Jahre Professor für mathematische Statistik in Heidelberg, und dieser Tradition folgend kamen seitdem die meisten Impulse von statistischer Seite (z.B. Hosking & Wallis 1997). Die Ingenieurhydrologie, die eigentlich aus einem reichen Erfahrungsschatz von Prozesskenntnis und Methoden hätte schöpfen können, war hier vergleichsweise passiv. Es ist deshalb nicht weiter verwunderlich, dass Regelwerke ihren Schwerpunkt auf statistische Methoden gelegt haben mit nahezu vollständiger Vernachlässigung der zugrundeliegenden hydrologischen Prozesse. Plotting Positions, Wahl der Verteilungsfunktion, Methode der Parameterschätzung, die Wahrscheinlichkeit von Ausreißern sind auch im DVWK Merkblatt 251 (Dwvk 1999) das Zentrum des Interesses.

Eine derartige Ausrichtung ist dann gerechtfertigt, wenn die den Methoden zugrunde liegenden Voraussetzungen zutreffen. Nun ist es allerdings so, dass für viele praktische ingenieurhydrologische Fragestellungen die meisten Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Die Abflussreihen sind in der Regel zu kurz, nicht stationär, fehlerbehaftet, entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit etc. Obwohl dies schon lange bekannt ist, wurde in der Regel auf weitere statistische Tests und Analysen gesetzt, in ähnlicher Weise wie sich Baron Münchhausen an seinen eigenen Haaren aus einem Sumpf gezogen haben will. Bei näherer Betrachtung ist allerdings klar, dass dadurch keine zusätzliche Information generiert

wird und damit die zu bestimmenden Hochwasserdurchflüsse nicht genauer werden können. Zusätzliche Information kann nur durch Berücksichtigung zusätzlicher hydrologischer Beobachtungen und Mechanismen eingebracht werden.

2 Konzeption

Die Vielfältigkeit und Komplexität von meteorologischen und hydrologischen Prozessen, die zu Hochwasserabflüssen führen können, wurden in der hydrologischen Literatur oft diskutiert (z.B. Gutknecht 1994; Hirschboeck 1988). Dennoch basiert die traditionelle Vorgehensweise der Hochwasserstatistik auf der Annahme, dass die Vielfältigkeit und Komplexität der Hochwasserprozesse durch wenige einzelne Beobachtungen von Hochwasserabflüssen erfasst werden können. Oft muss weit über den Bereich des bisher Beobachteten hinaus extrapoliert werden. Die Abflussprozesse bei Extremereignissen können sich jedoch gegenüber den üblicherweise beobachteten Hochwässern stark verschieben. Sinnvoll ist es daher, Informationen über die Prozesse und Zusammenhänge von Hochwässern im betreffenden Gebiet in die Berechnung einfließen zu lassen. Zusatzinformationen zur Verbesserung der lokalen Schätzung von Hochwasserkenngößen können – der Wortwahl von Dyck (1980, S. 278–279) und Grünewald (2006) folgend – in zeitliche, räumliche und kausale Informationen unterschieden werden. Eine zeitliche Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in Bezug zur längeren hydrologischen Geschichte des Gebietes setzt. Eine räumliche Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in einem Gebiet mit denen in Nachbargebieten in Bezug setzt. Eine kausale Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel mit den Prozessen der Hochwasserentstehung in Bezug setzt. Die Bestimmung von Hochwasserabflüssen erfolgt dann durch die Kombination von statistischen Analysen mit der zeitlich, räumlich und kausal erweiterten Information. Einzelne Zusatzinformationen werden häufig zur Bestimmung von

Hochwasserabflüssen herangezogen, wie etwa historische Hochwässer (z.B. GRÜNEWALD 2007) oder regionale Hochwasserstatistik (MERZ & BLÖSCHL 2005). So zählt es zur langjährigen Praxis der Hydrographischen Dienste in Österreich, „die Schwächen der rein statistischen Berechnung durch Anwendung anderer Methoden zu mildern“ (GODINA 1998), wozu u.a. Hüllkurven und Spendendiagramme zählen. Eine einzelne Art der Zusatzinformation kann jedoch nie alle Aspekte der Hochwasserentstehung erfassen. Mehrere Arten der Zusatzinformation ergeben ein vollständigeres Bild. Die zu kombinierenden Methoden sollten sich möglichst unterscheiden in Hinblick auf die Voraussetzungen und Annahmen bzgl. der zu beschreibenden hydrologischen Prozesse und Einflussfaktoren, um so einander ergänzende Information in die Berechnung einzubringen. Ebenso sollten die Methoden möglichst unterschiedliche Daten einbeziehen, z.B. unterschiedliche Datentypen wie Abfluss oder Niederschlag oder Daten mit unterschiedlichem Beobachtungszeitraum bzw. an unterschiedlichen Messstellen. Art und Umfang der verwendbaren Zusatzinformationen unterscheiden sich für jedes Gebiet je nach Datenlage. Manche Informationen erlauben eine quantitative Schätzung, wie dies bei der räumlichen Informationserweiterung mittels regionaler Hochwasserstatistik der Fall ist. Andere Informationen erlauben nur qualitative Aussagen über ein plausibles Hochwasserverhalten und erfordern ein gewisses Maß an Experteneinschätzung. Gerade solche qualitativen Informationen beleuchten oft jene Aspekte des Hochwasserverhaltens, die in quantitativen, aus Messwerten abgeleiteten Aussagen nicht enthalten sind. Ein Beispiel hierfür sind Rückschlüsse aus der Morphologie und Gebietsbeschaffenheit auf das Hochwasserverhalten. AULITZKY (1992) prägte dafür den Begriff der „Sprache der Stummen Zeugen“. Der hier verwendete Begriff der Information soll dies zum Ausdruck bringen. Nicht nur neue Beobachtungsdaten und quantitative Aussagen daraus werden als nützliche Quelle zur Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten betrachtet. Ein wesentlicher Bestandteil der Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten der hier vorgestellten Vorgangsweise ist die hydrologische Analyse, Interpretation und Argumentation basierend auch auf qualitativem Wissen und Erfahrungen und „Soft“-Informationen.

Die Einbeziehung möglichst unterschiedlicher Methoden und Daten zielt darauf ab, möglichst viele Prozesse und Einflussfaktoren der Hochwasserentstehung zu erfassen. Geht man davon aus, dass die Unsicherheiten der aus den einzelnen Informationen gewonnenen Hochwasserschätzwerte voneinander unabhängig sind, was aufgrund der Unterschiede in Konzeption und Daten oft gerechtfertigt sein wird, ergibt sich aus statistischen Überlegungen, dass der durch eine Kombination ermittelte Schätzwert zuverlässiger ist als jeder der einzelnen Schätzwerte. Generell ist es ja in der Wissenschaft so, dass, wenn eine neue Erkenntnis mit unabhängigen Methoden belegt ist, diese als gesicherter angesehen werden kann, als wenn nur das Ergebnis einer einzelnen Methode dafür spricht.

Jede der verwendeten Informationen ist mit einem eigenen zugehörigen Vertrauensbereich oder Unschärfe-Bereich verbunden. In der klassischen Hochwasserstatistik entspricht dies den Konfidenzintervallen oder dem Ergebnisspektrum bei Verwendung mehrerer Verteilungsfunktionen (DvWK 1999). Die Größe des Unschärfe-Bereiches hängt von der Güte der verwendeten Daten und der Eignung und Güte des verwendeten Modells ab. Bei qualitativer Information, wie z.B. Rückschlüsse aus der Morphologie, kann kein quantitativer Unsicherheitsbereich angegeben werden, es ist aber vielmals möglich, eine grobe Einschätzung eines Bereiches anzugeben, in der eine Schätzung aufgrund dieser Information sinnvoll ist. Die Ermittlung des maßgebenden Hochwasserab-

flusses erfolgt dann durch Kombination der einzelnen Schätzwerte und Überlagerung der einzelnen Vertrauensbereiche. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten. Im ersten Fall führen die einzelnen Informationsquellen zu einer konsistenten Schätzung, d.h. die Vertrauensbereiche der einzelnen Schätzungen überlappen sich. In diesem Fall ist es sinnvoll, den maßgebenden Hochwasserabfluss in den Überlappungsbereich zu legen und die Gesamtunsicherheit wird dadurch reduziert. Formale Verfahren wie Bayes Statistik oder Fuzzy Logics zur Kombination verschiedener Vertrauensbereiche könnten hier zur Anwendung kommen. Im vorliegenden Beitrag erfolgt die Schätzung des maßgebenden Hochwasserabflusses manuell auf Basis von Experteneinschätzung. Im zweiten Fall sind die einzelnen Schätzwerte inkonsistent, d.h. es gibt keinen eindeutigen Bereich, in dem sich die einzelnen Vertrauensbereiche überlagern. Grund hierfür können Datenfehler oder Aspekte sein, die in den bisher verwendeten Informationen nicht erfasst wurden. In diesem Fall wird vorgeschlagen, die verwendeten Daten und Methoden nochmals zu untersuchen um die Ursachen der Inkonsistenz zu verstehen bzw. neue Informationsquellen in die Berechnung mit einzubeziehen. Lässt sich die Inkonsistenz nicht beheben, ist mit einem großen Unsicherheitsbereich zu rechnen, der die einzelnen Streubereiche umfasst. Gerade im zweiten Fall ist es wichtig, dass die Kombination der einzelnen Informationen durch das hydrologische Verständnis über die Vorgänge im Gebiet geleitet wird. Die Gesamtunsicherheit ist in diesem Fall vielleicht größer als die Unsicherheit, die sich nur aus der Hochwasserstatistik ergibt, dies ist bei widersprüchlichen Befunden aber auch realistischer.

Der hier vorgestellte Ansatz ist in der Konzeption dem von GUTKNECHT et al. (2006) vorgeschlagenen „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeiten ähnlich (siehe auch GUTKNECHT 2007). Auch bei GUTKNECHT et al. (2006) erfolgt die Bemessung durch Kombination verschiedener Methoden, die als Standbeine bezeichnet werden, um so der Schätzung ein breiteres und sicheres Fundament zu geben. Das Schwergewicht liegt dabei allerdings auf der Niederschlag-Abflussmodellierung. Eine ähnliche Vorgangsweise der Kombination von Informationen im Zusammenhang mit der Bestimmung von Wellenablaufparametern wurde in RESZLER et al. (2008) gewählt. Aufgrund der Vielfältigkeit der Hochwasserprozesse und aufgrund der Tatsache, dass für jedes Gebiet unterschiedliche Daten und Informationen vorliegen, wird hier keine strikte Methode zur Informationserweiterung und Kombination vorgeschlagen. Die geeignete Wahl von Daten und Methoden hängt vom Einzelfall ab. Die generelle Vorgehensweise der Kombination von Statistik mit den drei Typen der Informationserweiterung bleibt aber gleich. Ziel dieses Beitrags ist es, anhand von Beispielen aus Österreich ein Konzept zu präsentieren, an dem sich die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten orientieren kann. Die Beispiele sind dem Projekt HORA (www.hochwasserrisiko.at) entnommen, in dem flächendeckend für das gesamte österreichische Gewässernetz Hochwasserrisikoflächen der Jährlichkeiten $T = 30$, $T = 100$ und $T = 200$ ausgewiesen wurden. Hierzu wurden Hochwasserwahrscheinlichkeiten für rund 700 Pegel nach der hier vorgestellten Vorgangsweise berechnet (MERZ et al. 2008).

3 Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten

3.1 Zeitliche Informationserweiterung

Als zeitliche Informationserweiterung wird die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in einen Bezug zur längeren hydrologischen Geschichte des Gebietes gesetzt. Eine Schwierigkeit bei der Interpretation von beobachteten Abflussreihen besteht darin, dass große Ereignisse vielfach in Gruppen von

einigen wenigen Extremjahren auftreten, gefolgt von Jahrzehnten ohne große Hochwässer. Beispiele sind die Jahre 1965/66 mit außerordentlich großen Hochwässern im Süden Österreichs oder die Jahre 1954 bis 1959 und 1897 bis 1899 mit großen Hochwässern im österreichischen Donaeinzugsgebiet. Es ist interessant, dass dieses Gruppierungsverhalten ziemlich universell sein dürfte, da es in vielen Ländern über viele Jahrhunderte beobachtet wurde (HURST 1951). Durch die Gruppierung von Hochwasserjahren besteht die Möglichkeit, dass eine Datenreihe von z.B. 40 Jahren keine großen Hochwässer enthält, obwohl in der Zukunft große Hochwässer zu erwarten sind. Auch der umgekehrte Fall von überdurchschnittlich großen Hochwässern im Datensatz ist möglich. Die Betrachtung eines längeren Zeitfensters gibt hier ein zuverlässigeres Bild. Dies kann über zwei Informationsquellen erfolgen, erstens durch den Vergleich mit längeren Abflussreihen von Nachbargebieten und zweitens durch die Analyse historischer Hochwasserereignisse.

Beim Vergleich mit längeren Abflussreihen von Nachbargebieten wird versucht, Hochwasserereignisse der beiden Stationen in Deckung zu bringen um abschätzen zu können, wie sich das kurze Zeitfenster in das längere Bild einordnet. Als Beispiel sind in Abbildung 1 (oben) die beobachteten jährlichen Hochwasserscheitel am Pegel St. Florian am Ipfbach in Oberösterreich dargestellt. Die maximal beobachteten Abflüsse im Zeitraum 1968 bis 2001 betrugen weniger als 43 m³/s, während 2002 ein Spitzenabfluss von 80 m³/s beobachtet wurde. Wird das 2002 Ereignis als Ausreißer eingestuft und aus dem Kollektiv entfernt, so ergeben sich ein Variationskoeffizient von $CV = 0.64$ und eine Schiefe von $CS = 1.53$. Belässt man das Ereignis 2002 im Kollektiv, so ergibt sich ein größerer Variationskoeffizient von $CV = 0.99$ und eine deutlich größere Schiefe von $CS = 3.8$, d.h. es würde eine sehr steile Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve gewählt werden.

Vergleicht man jedoch diese Zeitreihe mit der längeren Zeitreihe des Nachbarpegels St. Georgen (Abb. 1, unten), so zeigt sich, dass zwar in der Periode 1968 bis 2001 auch in St. Georgen nur kleinere Hochwässer beobachtet wurden, aber vor 1968 auch viele große Hochwasser aufgezeichnet wurden. Für den Pegel St. Georgen hat das Ereignis 2002 sogar nur die viertgrößte Spitze in der beobachteten Reihe. Der Variationskoeffizient des Kollektivs am Pegel St. Georgen be-

trägt 0.64, die Schiefe beträgt 1.51. Es ist nun anzunehmen, dass auch in St. Florian vor 1968 größere Hochwässer aufgetreten sind und die Beobachtungsreihe mit einer hochwasserarmen Periode zusammengefallen ist. Daher sind in St. Florian ein ähnlicher Variationskoeffizient und eine ähnliche Schiefe wie am Pegel St. Georgen zu erwarten. Eine rein statistische Auswertung des beobachteten Kollektivs ohne das Ereignis 2002 in St. Florian ergibt somit eine zu flache Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve, eine statistische Auswertung des Kollektivs mit dem Ausreißer 2002 ergibt eine viel zu steile Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve.

Eine zweite Möglichkeit der zeitlichen Informationserweiterung ist die Auswertung historischer Hochwasserereignisse. In vielen Gebieten liegen Informationen über historische Hochwässer vor. Art und Umfang der Informationen können sehr unterschiedlich sein. Neben Berichten in Archiven und Chroniken, die oftmals nur sehr ungenaue und unsichere Rückschlüsse auf historische Abflussmengen zulassen, können Hochwassermarken an Gebäuden (insbesondere an Flüssen mit großen Einzugsgebieten) und Photographien herangezogen werden, um näherungsweise das Ausmaß der Überschwemmung einzuschätzen und eine Reihung der Jährlichkeiten historischer Hochwässer und der größten Hochwässer des Kollektivs zu ermöglichen. Durch die Auswertung historischer Hochwässer lässt sich dem Kollektiv ein längerer Beobachtungszeitraum zuordnen. Neben den Jahren mit Pegelbeobachtungen liegt dann ein weiterer Zeitraum vor, der bis zum ältesten, noch auswertbaren historischen Hochwasser zurückreicht (GRÜNEWALD 2007). Durch die Einbeziehung historischer Daten kann die Schätzung besonders im Hinblick auf die Extrapolation zu höheren Jährlichkeiten und bei Ausreißern deutlich verbessert werden.

In der Literatur gibt es eine Reihe von formalen Verfahren zur Berücksichtigung von hochwasserreichen und hochwasserarmen Perioden (IH 1999) und von historischen Hochwässern (STEDINGER et al. 1993; DVWK 1999; BAYLISS & REED 2001) bei der Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten.

3.2 Räumliche Informationserweiterung

Zur räumlichen Informationserweiterung werden die Reihen der beobachteten Abflüsse in einem Gebiet mit den Reihen von Nachbargebieten in Bezug gesetzt. Ein mögliches Konzept ist die Gruppierung (oder Pooling) von Gebieten in „homogene“ Regionen, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Die Idee des Ansatzes ist es, fehlende Information in der Zeit durch räumliche Information zu ersetzen. Werden z.B. zehn 50-jährige Reihen zusammengefasst, so entspricht dies (unter Annahme der Homogenität der Gruppe und statistischer Unabhängigkeit) einem Kollektiv von 500 Jahren. In einem so „verlängerten“ Kollektiv sollte mehr Information enthalten sein, die Jährlichkeiten von Abflüssen genauer zu bestimmen. Beobachtete Hochwasserkollektive sind freilich nicht immer unabhängig und homogen, aber es existieren eine Reihe von formalen Methoden, lokale Hochwasserabflüsse in Bezug zu Nachbargebieten zu setzen, z.B. die Index Flood Methode (DALRYMPLE 1960), die Region of Influence Methode (BURN 1990; IH 1999), Regres-

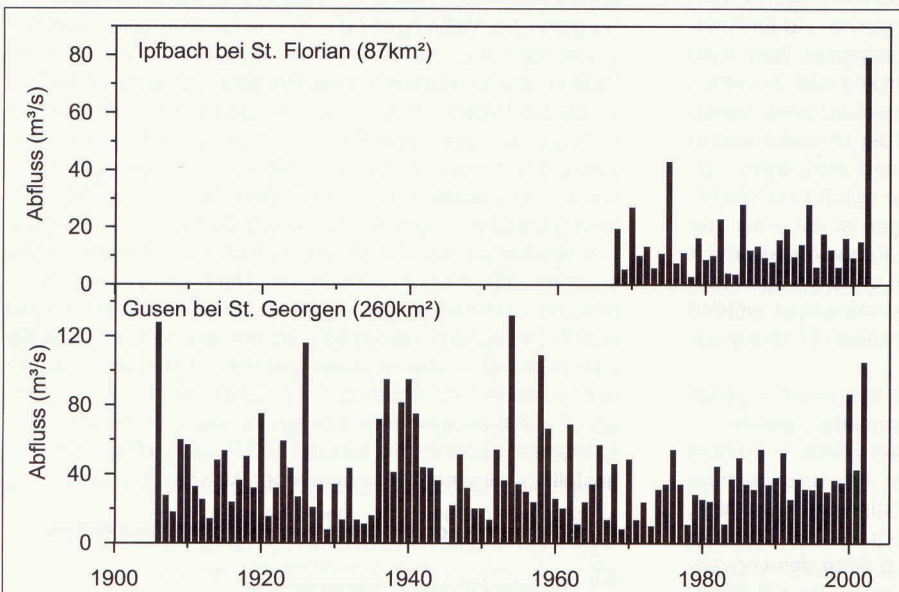


Abbildung 1

Beobachtete jährliche Abflussscheitel des Ipfbach bei St. Florian (oben) und der Gusen bei St. Georgen (unten).

Time series of observed maximum annual peak discharges of the River Ipfbach at St. Florian (top) and the River Gusen at St. Georgen (bottom).

sopt ist die Gruppierung (oder Pooling) von Gebieten in „homogene“ Regionen, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Die Idee des Ansatzes ist es, fehlende Information in der Zeit durch räumliche Information zu ersetzen. Werden z.B. zehn 50-jährige Reihen zusammengefasst, so entspricht dies (unter Annahme der Homogenität der Gruppe und statistischer Unabhängigkeit) einem Kollektiv von 500 Jahren. In einem so „verlängerten“ Kollektiv sollte mehr Information enthalten sein, die Jährlichkeiten von Abflüssen genauer zu bestimmen. Beobachtete Hochwasserkollektive sind freilich nicht immer unabhängig und homogen, aber es existieren eine Reihe von formalen Methoden, lokale Hochwasserabflüsse in Bezug zu Nachbargebieten zu setzen, z.B. die Index Flood Methode (DALRYMPLE 1960), die Region of Influence Methode (BURN 1990; IH 1999), Regres-

sion von Hochwasserkenngrößen mit Gebietseigenschaften (z.B. DÜSTER 1994; LUFT et al. 1999; IH 1999; SCHUMANN & PFÜTZNER 2002) und geostatistische Verfahren (MERZ & BLÖSCHL 2005).

Zur Darstellung der Argumentation bei der räumlichen Informationserweiterung werden in diesem Beitrag als einfaches Regionalisierungsverfahren regionale Spendendiagramme herangezogen, bei denen für eine homogene Region die statistischen Hochwasserkennwerte der Pegelgebiete als Spenden (z.B. HQ_{100}) gegen die Gebietsfläche graphisch aufgetragen werden. Ist das Hochwasserverhalten der Gebiete in dieser Region ähnlich, so nimmt die Hochwasserspende mit der Gebietsfläche in ähnlicher Weise ab. Ebenso können in regionale Spendendiagramme auch Ergebnisse anderer Regionalisierungsverfahren eingetragen werden. Abbildung 2 zeigt die 100-jährlichen Abflussspenden aus der Pegelstatistik (Kreuze) für Gebiete der Region östliches Kärnten. Zusätzlich sind regionalisierte 100-jährliche Abflussspenden ohne Verwendung lokaler Daten (Kreise) in das Spendendiagramm eingetragen. Als Regionalisierungsverfahren wurde in diesem Fall das Top-Kriging Verfahren (SKØIEN et al. 2006) gewählt, welches eine Erweiterung der geostatistischen Kriging Methode ist und die räumlichen Korrelationen der Hochwassermomente auswertet. Top-Kriging berücksichtigt die Topologie der Einzugsgebiete, und bei der Schätzung der Hochwasserkenngrößen wird mehr Gewicht auf Ober- und Unterliegergebiete ähnlicher Gebietsfläche gelegt als auf nahe gelegene Gebiete am benachbarten Gewässer. Ebenso wird mehr Gewicht auf Gebiete mit langen Reihen als auf Gebiete mit kurzen Reihen gelegt. Für die Region Ostkärnten (Abb. 2) zeigt sich für viele Pegel eine Abweichung des regionalen Trends von der lokalen Hochwasserstatistik. So liegen die regionalen Abschätzungen für die Pegel St. Leonhard an der Lavant und Zollfeld an der Glan deutlich höher als die statistischen Auswertungen lokaler Daten. Eine genauere Betrachtung der Kollektive zeigt, dass die relativ kurze Pegelreihe in St. Leonhard in eine Periode mit eher kleinen Hochwässern fällt und die lokale Statistik somit die Hochwasserabflüsse unterschätzt. In Zollfeld wird der Pegel bei größeren Hochwässern umflossen und somit unterschätzt auch bei diesem Pegel die lokale Statistik die Hochwasserabflüsse.

Während regionale Spendendiagramme für kleinere und mittlere Flüsse geeignet sind, sind für größere Flüsse, bei denen die Flächenzunahme entlang des Flusslaufes klein gegenüber der Gebietsfläche ist und mehrere Pegel am gleichen Flusslauf vorhanden sind, hydrologische Längenschnitte das günstigere Werkzeug zur Darstellung der regionalen Zusammenhänge, da sich Bilanzüberlegungen aufstellen lassen. Dabei ist es wichtig, etwaige Ausuferungen zu berücksichtigen. An der Donau oberhalb Wiens nimmt beispielsweise das HQ_{100} von Krems bis Wien von 11 200 auf 10 400 m^3/s ab, obwohl die Einzugsgebietsgröße zunimmt. Grund dafür sind die Ausuferungen im Tullnerfeld. Durch Bilanzüberlegungen lassen sich auch Fehler in den beobachteten Abflussdaten erkennen.

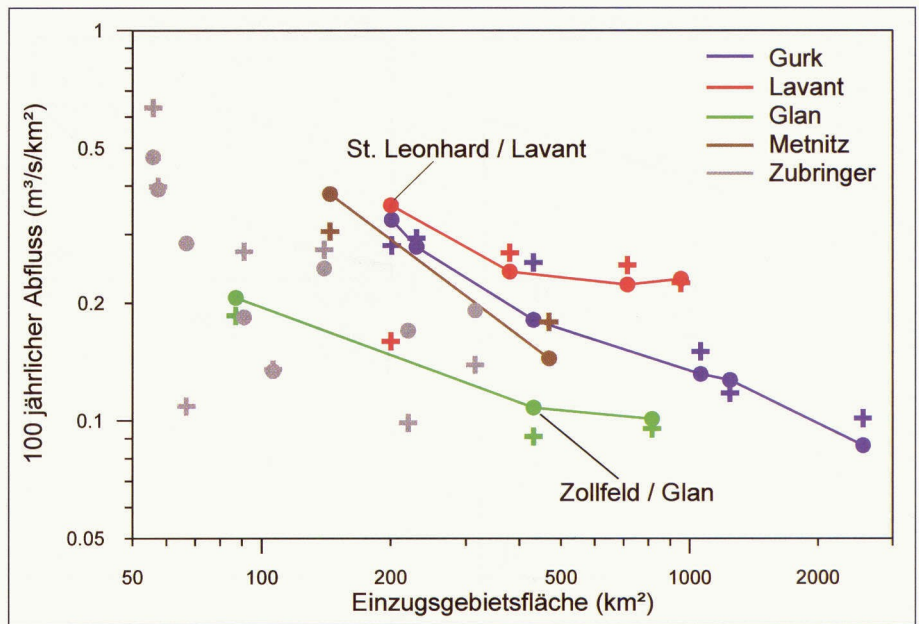


Abbildung 2

Regionales Spendendiagramm der Region östliches Kärnten. Die 100-jährlichen Abflussspenden aus lokalen Abflussdaten sind als Kreuze dargestellt. Regionalisierte Werte ohne Verwendung lokaler Daten sind als Kreisflächen eingezeichnet.

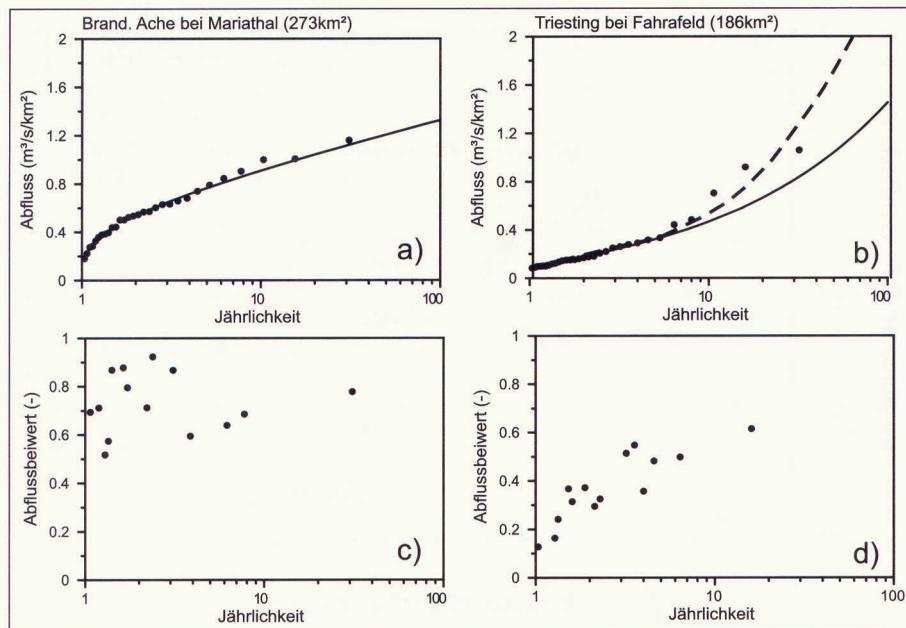
Discharge-area diagram of eastern Carinthia. Specific 100-year flood discharges from locally observed data are shown as crosses. Regional estimates using flood data from neighbouring stations are shown as full circles.

3.3 Kausale Informationserweiterung

Als kausale Informationserweiterung wird die Reihe der beobachteten Abflussscheitel mit den Prozessen der Hochwasserentstehung in Bezug gesetzt. Eine Kenntnis der hochwasserbestimmenden Prozesse ist besonders dann von Vorteil, wenn weit über den Bereich des bisher Beobachteten hinaus extrapoliert werden muss.

Nahe liegend ist die Einbeziehung von Niederschlag. Ein einfaches und robustes Verfahren ist das Gradex-Verfahren (MERZ et al. 1999a), das aus einer Kombination von Niederschlagsstatistik und Hochwasserstatistik durch ein einfaches Niederschlag-Abflussmodell besteht. Ab einem Hochwasser einer festgelegten Jährlichkeit, z.B. 30 Jahre, wird im Gradex-Verfahren eine vollständige Sättigung des Gebiets angenommen. Jeder zusätzliche Niederschlag, d.h. Niederschlag einer größeren Jährlichkeit, trägt dann zur Gänze zu einem zusätzlichen Abfluss bei. Der Hochwasserabfluss höherer Jährlichkeit kann damit abgeschätzt werden. Durch die Annahme der Sättigung stellen die Werte aus dem Gradex-Verfahren im Allgemeinen eine obere Schranke der Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Österreich dar (MERZ et al. 1999a). Komplexere Verfahren zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten aus dem Niederschlag werden in der Literatur unter dem Begriff „Abgeleitete Hochwasserstatistik“ zusammengefasst. Ihnen liegt in der Regel ein stochastisches Niederschlagsmodell und ein Abflussmodell zugrunde (siehe SIVAPALAN et al. 2005, MEON et al. 2007, BLÖSCHL 2007).

Neben dem Niederschlag ist die Abflussbildung ein maßgebender Faktor für die Größe des Hochwasserabflusses. Daher stellt die Analyse von Abflussbeiwerten von beobachteten Hochwässern ein weiteres Beispiel kausaler Informationserweiterung dar. Der Abflussbeiwert beschreibt, welcher Anteil des Ereignisniederschlags während eines Ereignisses zum Abfluss kommt. Auswertungen von über 50 000 Ereignissen in Österreich (MERZ et al. 2006) zeigen, dass die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve eng mit der Größe der Abflussbeiwerte zusammenhängt. In den niederschlagsreichen

**Abbildung 3**

Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven (oben) und Abflussbeiwerte der zugehörigen Hochwasserereignisse (unten). Links: Brandenberger Ache bei Mariathal (273 km^2), rechts: Triesting bei Fahrafeld (186 km^2). Durchgezogene Kurve: Anpassung an die Hochwasserscheitel mittels AEV. Strichlierte Kurve in b): Extrapolation bei Berücksichtigung der Zunahme der Abflussbeiwerte mit der Jährlichkeit.

Flood frequency plots (top) and runoff coefficients of associated flood events (bottom) plotted against the return periods of the flood peaks. Left: Brandenberger Ache at Mariathal (273 km^2) Right: Triesting at Fahrafeld (186 km^2). The statistical flood frequency curve based on the GEV distribution is shown as solid line. An extrapolation of flood frequency curve based on the analysis of runoff coefficients is shown as dashed line.

Gebieten am Alpennordrand sind die Abflussbeiwerte der Hochwässer in der Regel sehr hoch. Diese deuten auf eine stetig hohe Abflussbereitschaft der Gebiete hin. Große Hochwässer unterscheiden sich somit von kleineren Hochwässern v.a. durch die Größe des Niederschlages. Deshalb ist mit einer eher kleinen Steigung und Krümmung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen. Zahlenmäßig entspricht die Steigung dem Variationskoeffizient und die Krümmung der Schiefe der Verteilung. In den niederschlagsarmen Gebieten im Osten sind die Abflussbeiwerte meistens klein, steigen aber mit der Jährlichkeit des Abflusses an. Große Abflussbeiwerte sind selten, können aber auftreten. Große Hochwässer können sich somit von kleineren Hochwässern nicht nur durch die Größe des Niederschlages unterscheiden, sondern auch durch einen wesentlich größeren Abflussbeiwert. Für solche Gebiete ist mit einer wesentlich größeren Steigung und Krümmung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen (MERZ 2007; BLÖSCHL 2007). Der Zusammenhang von Abflussbeiwerten und der Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve wird anhand von zwei Gebieten in Abbildung 3 verdeutlicht. In Abbildung 3a sind die beobachteten maximalen jährlichen Hochwasserabflüsse der Brandenberger Ache bei Mariathal in Tirol gegen ihre Jährlichkeit aufgetragen. Die Abflussbeiwerte bei zugehörigen Hochwasserereignissen sind in Abbildung 3c aufgetragen. Das Gebiet liegt in der sehr regenreichen Region am Alpennordrand. Die Abflussbeiwerte sind unabhängig von der Größe des Hochwassers sehr hoch. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist eher flach. Im niederschlagsarmen Gebiet Triesting bei Fahrafeld in Niederösterreich (Abb. 3b) sind die beobachteten Hochwasserabflüsse kleiner. Auch die Abflussbeiwerte (Abb. 3d) sind wesentlich kleiner, steigen aber mit größerer Jährlichkeit stark an. Durch die ausgeprägte Nichtlinearität der Abflussbildung ist die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve des Pegels Fahrafeld steil und nach oben gekrümmt. Aufgrund des starken

Anstieges der Abflussbeiwerte von Ereignissen höherer Jährlichkeit kann man annehmen, dass ab einer Jährlichkeit von etwa vier bis fünf Jahren eine plausible Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve steiler sein sollte als die statistische Anpassung an die beobachteten Scheitel angibt. Eine solche Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve, die besser an die Hochwasserereignisse höherer Jährlichkeiten angepasst wurde, ist in Abbildung 3b als gestrichelte Linie markiert.

Niederschlag und Gebietsinformationen können natürlich auch durch Niederschlag-Abflussmodelle gefasst werden. Der Vorteil besteht dabei darin, dass sehr umfangreiche Prozessvorstellungen einfließen können (z.B. hydraulische Abflussvorgänge). Allerdings bereitet die Einschätzung der Jährlichkeit der berechneten Abflussscheitel gewisse Schwierigkeiten, da die Jährlichkeit des Abflusses nicht notwendigerweise gleich der Jährlichkeit des zugehörigen Niederschlages ist (BLÖSCHL 2007). Vergleiche der Ergebnisse der Niederschlag-Abflussmodellierung mit den anderen Informationen tragen aber zur gegenseitigen Stützung bei. Als Erweiterung können Nieder-

schlag-Abflussmodelle mit generierten Niederschlagszeitreihen gespeist werden, um weitergehende statistische Aussagen in ähnlicher Weise wie bei der abgeleiteten Hochwasserstatistik zu erhalten.

Eine weitere kausale Informationsquelle ist die Analyse der Hochwassergenese aus den Beobachtungsdaten. MERZ et al. (1999b) und SCHUMANN (2005) analysierten verschiedene Hochwasserprozesse durch eine saisonale Hochwasserstatistik. MERZ & BLÖSCHL (2003) untersuchten über 11 000 Hochwasserereignisse in Österreich in Hinblick auf ihre Entstehungsmechanismen und klassifizierten sie in fünf Typen: Hochwässer zufolge langer Niederschläge, kurzer Niederschläge und Gewitter, sowie Regen-auf-Schnee Ereignisse und Schneeschmelzhochwässer. Die statistischen Eigenschaften der Hochwasserkollektive, aufgegliedert nach Prozessstypen, zeigten deutliche Unterschiede. Bei Einzugsgebieten mit häufigen Gewittern etwa ist die Schiefe wesentlich größer als bei Einzugsgebieten mit einem großen Anteil an Schneeschmelzhochwässern.

Eine wichtige kausale Zusatzinformation zur Verbesserung der Schätzung ist die lokale Gebietskenntnis. Dies ist insbesondere bei kleinen Gebieten zielführend. Einerseits können Informationen über Geologie, Boden, Landnutzung, Topographie, Klima und anthropogene Eingriffe Hinweise auf unterschiedliches Verhalten geben. Diese Informationen können in formale Regionalisierungsmethoden, wie z.B. Mehrfachregressionen, eingebunden werden. Jedoch ist das Zusammenspiel von Klima, Topographie, Geologie etc. bei der Entstehung von Hochwasserereignissen sehr komplex und oftmals nicht durch Mehrfachregressionen abbildbar (BLÖSCHL & MERZ 2008). Scheinkorrelationen können auftreten (MERZ & BLÖSCHL 2005). Jedoch sind Karten dieser hydrologisch relevanten Informationen eine wertvolle Hilfe bei der Experteneinschätzung des Hochwasserrisikos. Solche Karten können auch dazu verwendet werden, die Aussagekraft anderer Informationsquellen,

wie z.B. die regionale Übertragung oder Abflussbeiwerte, in Hinblick auf die Einschätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu beurteilen. Insbesondere bei kleinen Einzugsgebieten ist jedoch die Einschätzung des hydrologischen Verhaltens auf Basis persönlicher Gebietskenntnis durch Begehungen und Detailstudien wichtiger. Beispielsweise können Morphologie und Bewuchs Informationen über das hydrologische Verhalten eines Gebietes geben. Sind persönliche Gebietsbegehungen nicht möglich, ist es hilfreich, Personen mit lokaler Gebietskenntnis, wie z.B. in Österreich die Sachbearbeiter der hydrographischen Landesdienste, in die Bestimmung der Hochwasserkenngrößen einzubinden.

Ein Beispiel der Morphologie des Gebietes als Prozessindikator zeigt Abbildung 4. Das linke Bild zeigt einen Ausschnitt einer topographischen Karte im Maßstab 1:50 000 des Einzugsgebietes der Lammer im regenreichen Salzburger Land, während im rechten Bild ein Ausschnitt des Einzugsgebietes des Braunaubaches im eher trockenen Norden Österreichs zu sehen ist. Zur deutlicheren Darstellung sind einige Höhenschichtenlinien schwarz herausgezeichnet. Die Höhenschichtenlinien zeigen, dass im Gebiet der Lammer die Gewässer tief eingeschnitten sind. Dies weist auf Erosionstätigkeit größerer Hochwässer hin. Im Gebiet des Braunaubaches sind die Gewässer nicht eingeschnitten. Offensichtlich sind hier Hochwasserabflüsse und somit die Erosionskraft deutlich geringer. Diese Einschätzung wird durch beobachtete Abflussdaten bestätigt. In Abbildung 4 unten sind die beobachteten Hochwasserspenden der Lammer bei Schwaighofbrücke (171 km²) und des Braunaubaches bei Amaliendorf (69 km²) eingezeichnet. Die spezifischen Hochwasserabflüsse der Lammer sind trotz der größeren Gebietsfläche deutlich größer. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve des Braunaubaches hat den Charakter eines trockenen Gebietes. Die meisten Hochwässer sind eher klein, größere Hochwässer sind selten. Ein anderer Indikator ist z.B. die Vegetation im Gebiet (MARKART et al. 2004) sowie im Gewässer (BLÖSCHL 2005). Ein bemooster Gewässerlauf deutet auf eher langsame Abflussreaktionen und damit kleine Hochwasserspenden hin, während Erosionstätigkeit auf schnelle Abflussreaktionen und damit große Hochwasserspenden schließen lässt.

3.4 Kombination von Hochwasserstatistik und Informationserweiterung

Als Beispiel für die Ermittlung von Hochwasserabflüssen durch die Kombination von Statistik und zeitlicher, räumlicher und kausaler Informationserweiterung wird die Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für den Pegel Zwettl am Kamp beschrieben (Abb. 5). Das Einzugsgebiet des Pegels Zwettl am Kamp hat eine Größe von 622 km² und liegt im niederösterreichischen Waldviertel. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Einschätzung der Hochwasserparameter nach den einzelnen Methoden, die im Folgenden beschrieben sind.

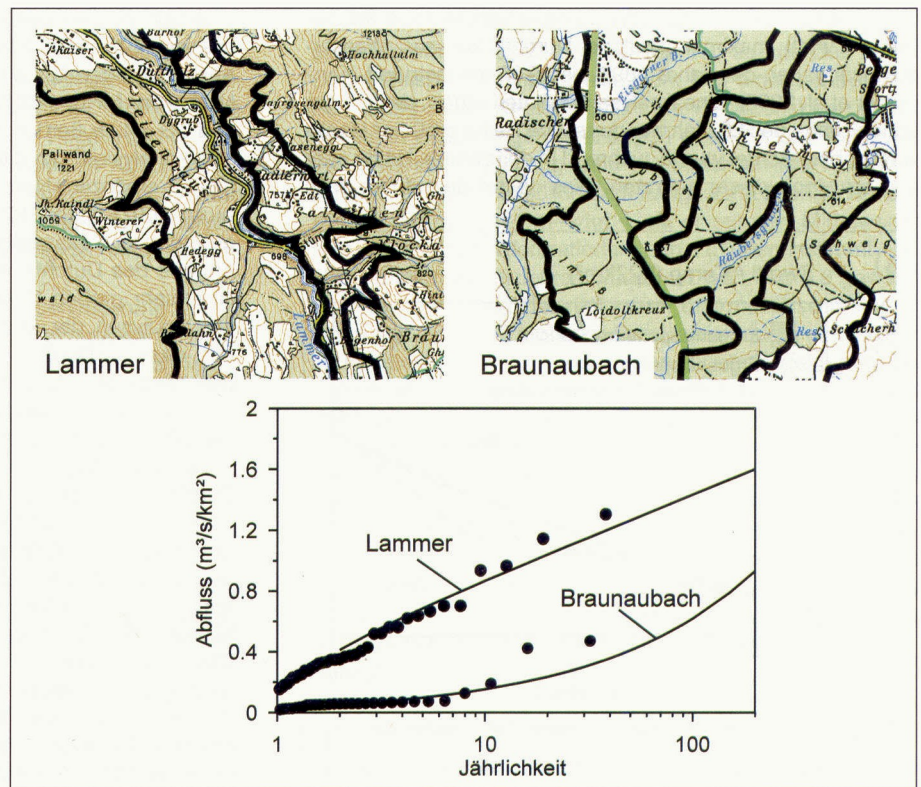


Abbildung 4

Ausschnitte der topographischen Karte 1:50000 der Einzugsgebiete der Lammer (171 km²) (links) und des Braunaubaches (69 km²) (rechts). Zur besseren Darstellung des Einschnittes der Gewässer im Relief wurden einige Höhenschichtenlinien schwarz herausgezeichnet. Unten: Beobachtete Hochwasserabflüsse der beiden Gebiete.

Top. Topographic maps of representative landforms of the Lammer catchment (left) and the Braunaubach catchment (right). Three contour lines are marked as thick black lines to demonstrate the degree of incision of the streams. Bottom: Flood frequency plots of observed data in the two catchments.

Für den Pegel Zwettl am Kamp liegen seit 1951 Abflussbeobachtungen vor. Die statistischen Auswertungen der Abflussreihen sind sehr durch das extreme Hochwasserereignis im August 2002 geprägt. Im August 2002 gelangten bei einer Vb-Wetterlage (MUDELSEE et al. 2004) feuchtlabile Luftmassen aus dem Mittelmeerraum nach Österreich. Das Tief über Österreich führte zu ausgiebigen, zum Teil sehr intensiven Niederschlägen in der Region. Die Abflussspitze von 460 m³/s (0,74 m³/s/km²) im August 2002 hat – je Anpassungsmethode – eine rechnerische Jährlichkeit von etwa 2000 bis 10000 Jahren wenn man die Reihe ohne das Extremereignis 2002 auswertet (GUTKNECHT et al. 2002), bzw. 50 bis 100 Jahren wenn man das Ereignis 2002 einbezieht. Bei Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) an die Reihe mit dem Ereignis 2002 errechnet sich der 100-jährliche Abfluss zu $HQ_{100} = 293 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Hq_{100} = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), ohne Ereignis 2002 beträgt er nur $148 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,24 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$). Die Anpassung an das Kollektiv mit und ohne Ereignis 2002 stellt somit ein Ergebnisspektrum der Statistik im Sinne von DWWK (1999) dar. Einen ähnlichen Effekt erhält man bei der Anpassung anderer Verteilungsfunktionen an das Kollektiv mit und ohne Ereignis 2002. Für zweiparametrische Verteilungen wie z.B. die Gumbel Verteilung ist das Ergebnisspektrum kleiner, für andere Verteilungsfunktionen (z.B. Log Pearson III) kann das Spektrum jedoch auch größer sein. Auch liefern verschiedene Parameterschätzmethoden (z.B. Momentenmethode vs. L-Momente) eine Spannweite von Hochwasserabschätzungen. Als Bereich plausibler statistischer Abschätzungen der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve wird in diesem Beispiel die Anpassung der AEV mit und ohne Ereignis 2002 angenommen (Tab. 1). Dieser ist in Abbildung 5a als dunkelgraue Fläche dargestellt.

Um die Information in der Zeit zu erweitern, wurden für den Pegel Zwettl maximal jährliche Durchflüsse aus Wasserstandsangaben der Jahre 1896 bis 1947 rekonstruiert (GUTKNECHT et al. 2002). Eine Analyse der Daten ergab, dass in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Reihe größerer Hochwässer beobachtet wurde, während in der zweiten Hälfte eher kleinere Hochwässer auftraten. Dies deutet darauf hin, dass

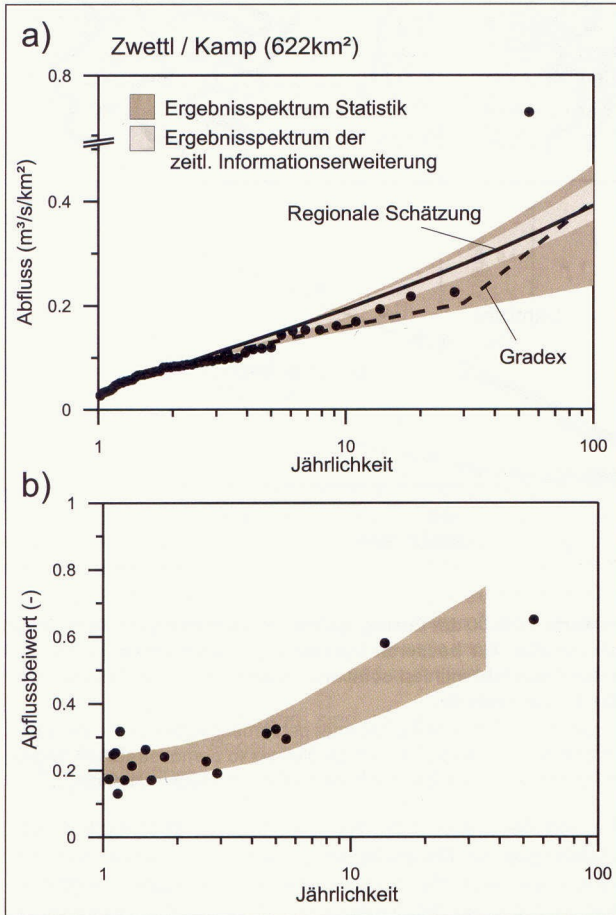


Abbildung 5
Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve und Zusammenschau der erweiterten Informationen (oben), und Abflussbeiwerte (unten) der Hochwasserereignisse für den Pegel Zwettl am Kamp.

Flood frequency plot and comparison of expanded information (top) and runoff coefficients of the associated flood events (bottom) of the River Kamp at Zwettl plotted against the return period of the flood peaks.

Tabelle 1

Einschätzung des Hochwasserverhaltens nach unterschiedlichen Methoden für den Pegel Zwettl am Kamp (622 km²). IE bedeutet Informationserweiterung. MHQ bezeichnet das mittlere jährliche Hochwasser, CV den Variationskoeffizienten und CS die Schiefe. Der hundert-jährliche Hochwasserabfluss HQ_{100} ergibt sich aus MHQ, CV und CS bei Wahl einer Allgemeinen Extremwertverteilung.

Estimation of the flood behaviour of the River Kamp at the gauge Zwettl (622 km²) by different methods. „IE“ stands for extended information; „MHQ“ = mean annual flood; „CV“ = coefficient of variation, and „CS“ = skewness. The 100-year flood HQ_{100} results from MHQ, CV, and CS assuming a general extreme value distribution.

Typ der Information	Daten und Methoden	MHQ (m³/s)	CV	CS	HQ100 (m³/s)
Statistik	Momentenmethode mit und ohne Ausreißer	57-63	0.51-0.98	1.14-5.21	148-293
Zeitliche IE	- aus Wasserständen rekonstruierte Hochwasserabflüsse - Historische Hochwasseranalyse	63	0.7-0.9	4	225-273
Räumliche IE	- Top-Kriging ohne lokale Daten	62	0.81	2.7	243
Kausale IE	- Gradex - Analyse der Abflussbeiwerte	63	0.65-0.85	4-6	215-262
Kombination		63	0.8	3.5	248

eine statistische Auswertung des Hochwasserkollektivs ohne Ereignis 2002 das Hochwasserverhalten unterschätzt. Eine Anpassung der AEV an das erweiterte Kollektiv ergibt für die Momente $MHQ = 63 \text{ m}^3/\text{s}$ ($MHQ = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), $CV = 0.9$ und $CS = 4$. Außerdem wurden historische Hochwasserereignisse analysiert, um die Information weiter in die Vergangenheit zu ergänzen. Nach Analysen historischer Quellen (WIESBAUER 2007) traten 1655, 1803 und 1829 neben 2002 die größten Hochwasserabflüsse der letzten 500 Jahre auf. Eine Angabe des Durchflusses dieser Ereignisse ist natürlich mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet, aber es lässt sich aus Analysen der überlieferten Überflutungsflächen schließen, dass die Durchflüsse der drei Ereignisse geringer als der Durchfluss des Ereignisses 2002 waren. Zwar wird 1655 und 1829 von Überflutungsflächen in einem ähnlichen Ausmaß wie 2002 berichtet, jedoch wurden die Hochwässer 1655 und 1829 durch Eisstau verursacht und die damit verbundenen Durchflüsse sind somit eher geringer einzuschätzen. 1803 waren mehr Flächen als im August 2002 überflutet, aber aufgrund baulicher Maßnahmen waren 1803 die Rückstauereffekte aus der Donau deutlich stärker als 2002 und die damit verbundenen Durchflüsse geringer. Historische Hochwässer können nach dem Verfahren des DVWK Merkblattes 251 (DVWK 1999) oder nach STEDINGER et al. (1993) in die Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten einbezogen werden. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich daraus für das Ereignis 2002 eine Jährlichkeit von über 400 Jahren. Als plausible Momente ergeben sich bei grafischer Darstellung $MHQ = 63 \text{ m}^3/\text{s}$ ($MHQ = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), $CV = 0.7$ und $CS = 4$. Der Bereich der Hochwasserabschätzung mittels zeitlicher Informationserweiterung (verlängerte Reihe bzw. historische Ereignisse) ist in Abbildung 5 hellgrau eingezeichnet und ist schmaler als das Ergebnisspektrum der rein statistischen Schätzung.

Zur räumlichen Informationserweiterung wurden im vorliegenden Beispiel die Hochwasserkennwerte für den Pegel Zwettl analog zu Abbildung 2 mittels Top-Kriging ohne Verwendung der lokalen Abflüsse (Jackknifing) bestimmt. Die so ermittelte Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist in Abbildung 5a (durchgezogene Linie) eingezeichnet. Die Momente betragen $MHQ = 62 \text{ m}^3/\text{s}$ ($MHQ = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), $CV = 0.81$ und $CS = 2.7$ (Tab. 1). Bei der Verwendung zusätzlicher Regionalisierungsverfahren wie z.B. Mehrfachregressionen könnte man auch bei der räumlichen Informationserweiterung ein Ergebnisspektrum erhalten. Für die meisten Pegel des Kampgebiets sind die regionalen Abschätzungen deutlich niedriger als die lokalen statistischen Auswertungen mit 2002. Dies trifft auch für den Kamp bei Zwettl zu (Tab. 1). Diese Unter-

schiede sind darauf zurückzuführen, dass das Ereignis 2002 außerhalb des Kampgebietes weniger extrem war und die regionale Schätzung sowohl von Pegeln innerhalb des Kampgebietes (z.B. Pegel Zwettl-Sportplatzbrücke, 269 km²) als auch außerhalb des Kampgebietes (z.B. Pegel Haid an der Naarn, 303 km²) bestimmt wird. Die regionale Abschätzung am Pegel Zwettl stimmt jedoch sehr gut mit der Abschätzung unter Berücksichtigung zeitlicher Informationserweiterung überein. Die beiden voneinander unabhängigen Informationsquellen stützen sich also gegenseitig.

Als eine mögliche kausale Informationserweiterung wurde das Gradex-Verfahren für den Pegel Zwettl angewandt (Abb. 5a, gestrichelte Linie). Hierbei wurden die maximal jährlichen Tagesniederschläge der letzten 88 Jahre der nahe gelegenen Station Rappottenstein mit der Hochwasserreihe am Pegel Zwettl kombiniert. Das Gradex-Verfahren ist dann anwendbar, wenn die Konzentrationszeit des Gebiets in der gleichen Größenordnung liegt wie die Zeitdiskretisierung der Niederschläge. Dies ist in diesem Gebiet mit einer Konzentrationszeit von ca. 8-12 Stunden der Fall. Die Anwendung des Gradex-Verfahrens führt zu einem 100-jährlichen Durchfluss von 250 m³/s. Obwohl beim Gradex-Verfahren das Ereignis 2002 selbst nicht berücksichtigt wurde, steigt die mit diesem Verfahren ermittelte Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve aufgrund des Niederschlagsverhaltens stark an. Die Form entspricht einem Variationskoeffizienten von etwa 0.65 bis 0.85 und einer Schiefe von etwa 6 (Tab. 1). Als weitere Zusatzinformation wurden in Abbildung 5b die Ereignisabflussbeiwerte der Reihe 1980-2003 gegen die Jährlichkeit der zugehörigen Abflussscheitel aufgetragen. Für kleinere Ereignisse liegen die Abflussbeiwerte zwischen 0.1 und 0.4 und steigen mit der Jährlichkeit der Hochwässer stark an. Für die beiden größten beobachteten Hochwässer sind die Abflussbeiwerte etwa 0.6. Grund für den hohen Abflussbeiwert des zweitgrößten Ereignisses (Mai 1996) ist die hohe Vorbefeuchtung durch Schneeschmelze (KOMMA et al. 2007). Die sonst eher kleinen Abflussbeiwerte im Kampgebiet sind auf die große Speicherkapazität der Böden zurückzuführen. Geologisch ist das Kampgebiet durch Granit, Gneis und Schiefer bestimmt. Der Granit ist teilweise stark verwittert und zerklüftet und aus dem Verwitterungsmaterial entstanden sandige Böden mit großer Speicherkapazität. Bei großen Niederschlagsmengen wird jedoch die Speicherkapazität überschritten und hohe Abflussbeiwerte können auftreten. Ein Beispiel für dieses nicht-lineare Verhalten ist das Extremereignis 2002. Vor dem Ereignis führte der Kamp Mittelwasser, die Böden waren eher trocken. Der erste Regenblock am Abend des 6. August 2002 führte zu einer Durchflussspitze von etwa 100 m³/s, welche etwa einem 10-jährlichen Hochwasser entspricht. Ein zweiter Regenblock mit ähnlich hohen Niederschlagsmengen und Intensitäten ließ aufgrund der inzwischen vielerorts gesättigten Böden die Abflussspitze bis zu 460 m³/s (0.74 m³/s/km²) ansteigen (BLÖSCHL et al. 2008). Aufgrund dieser Nichtlinearität der Abflussbildung ist beim Pegel Zwettl mit einer steileren Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen, als durch eine rein statistische Auswertung des Kollektivs ohne den Extremwert 2002 ermittelt würde. Die beobachteten Hochwasserkollektive in anderen Gebieten mit ähnlichem nicht-linearen Verhalten der Abflussbildung weisen teilweise Schiefen größer als 4 auf. Daher wurde auf Basis der kausalen Einschätzung eine verhältnismäßig große Schiefe zwischen 4 und 6 gewählt. Dies stimmt gut mit dem Ergebnis des Gradex-Verfahrens überein (Tab. 1).

Der Vergleich in Tabelle 1 zeigt, dass die Hochwasserabschätzungen aufgrund der zeitlichen, räumlichen und kausalen Informationserweiterung alle innerhalb des durch die Statistik aufgespannten Ergebnisspektrums fallen. In diesem Fall wird durch die Informationserweiterung das Ergebnis-

spektrum deutlich verkleinert, da sich die Informationen gegenseitig stützen und kein Widerspruch auftritt. Das vorgestellte Beispiel entspricht also dem Fall einer konsistenten Schätzung (siehe Kapitel 2), d.h. die Vertrauensbereiche der einzelnen Schätzungen überlappen sich. Für den Mittelwert der gewählten Verteilung kann der Mittelwert des Hochwasserkollektivs (einschließlich dem Ereignis 2002) angenommen werden (63 m³/s, 0.1 m³/s/km²), da er mit den Mittelwerten aller erweiterten Informationen nahezu übereinstimmt. Für den Variationskoeffizienten wurde ein Wert von 0.8 gewählt, der etwa dem Wert der regionalen Informationserweiterung entspricht. Er liegt im oberen Bereich des durch die anderen Informationsquellen aufgespannten Ergebnisspektrums. Die Schiefe wurde aufgrund des starken nicht-linearen Verhaltens des Kamp und der Tatsache, dass in der Region im Beobachtungszeitraum tendenziell kleinere bis mittlere Hochwässer beobachtet wurden, im Vergleich zum regionalen Wert leicht erhöht und mit 3.5 angenommen. Der 100-jährliche Abfluss ergibt sich dann bei Wahl einer allgemeinen Extremwertverteilung zu 248 m³/s (0.4 m³/s/km²). Dieser Wert entspricht auch nahezu dem Ergebnis des Gradex-Verfahrens (250 m³/s, 0.4 m³/s/km²). Der Abfluss des Ereignisses 2002 hat mit dieser Wahl der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve eine Jährlichkeit von etwa 1000 Jahren.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Kernpunkt der hier vorgestellten Vorgangsweise ist es, durch zeitliche, räumliche und kausale Zusatzinformationen die Abflussprozesse im Gebiet genauer zu erfassen, als es durch die statistische Analyse der beobachteten Hochwasserscheitel alleine möglich ist. Die Anwendung der Vorgangsweise in Österreich zeigt, dass diese Informationsquellen verschiedene Aspekte der Hochwasserentstehung beleuchten und wertvolle Aufschlüsse über das Hochwasserverhalten geben. Die unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Informationsquellen stützen sich gegenseitig im dargestellten Beispiel, und somit ist eine zuverlässigere Schätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu erwarten als durch die traditionelle Hochwasserstatistik, die nur auf der Analyse der beobachteten Hochwasserscheitel beruht.

Die hier vorgestellte Vorgangsweise kann somit als Muster für die Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in anderen Gebieten dienen. Art und Umfang der zu verwendenden Methoden und Analysen hängen hierbei von den für das entsprechende Gebiet vorhandenen Daten und Informationen sowie den relevanten hydrologischen Prozessen ab. Im vorliegenden Beitrag wurden einige der wichtigsten Informationsquellen und Prozesse beispielhaft dargestellt. Zusätzliche, häufig wichtige Prozesse sind z.B. die Seeretention und Beeinflussungen durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen. Derartige Prozesse wurden in MERZ et al. (2008) ebenfalls berücksichtigt. Generell unterscheiden sich sowohl die Prozesse als auch die typischerweise vorhandenen Daten und Informationen nach der Gebietsgröße. In kleinen Gebieten ist etwa die Ausbildung von Sättigungsflächen relevant, während in großen Gebieten das Ausuferungsverhalten im Vordergrund stehen wird. In kleinen Gebieten können stumme Zeugen (z.B. geomorphologische Indikatoren) wertvolle Informationen liefern, während in großen Gebieten der Vergleich von Ober- und Unterliegerpegeln sowie Ausuferungsmarken im Vordergrund stehen können. Wichtig erscheint es jedoch, möglichst Zusatzinformationen aller drei Typen (zeitlich, räumlich und kausal) in die Berechnung mit einzubeziehen, damit sich jeweils unsichere Informationen gegenseitig stützen.

Die hier vorgeschlagene Methode der Kombination verschiedener Informationsquellen mittels Experteneinschätzung ist mit einem gewissen Maß an Subjektivität verbunden. Die manuelle Einschätzung besitzt jedoch den Vorteil,

dass sich Aspekte und Interaktionen berücksichtigen lassen, die nur schwer formalisierbar sind. Viele vorhandene Informationen wie z.B. Rückschlüsse aus der Morphologie und Gebietsbeschaffenheit auf das Hochwasserverhalten (AULITZKY 1992) erlauben nur qualitative Aussagen über ein plausibles Hochwasserverhalten. Da viele formale Verfahren jedoch quantitative Aussagen erfordern, können diese wichtigen qualitativen Informationen nicht berücksichtigt werden. Ein formales Verfahren, welches sich zur Kombination von quantitativen als auch qualitativen Informationsquellen eignet, ist die Bayes Statistik. Auch täuschen viele formale Verfahren eine Scheinobjektivität vor. Formale Verfahren beruhen auf subjektiven Annahmen, wie z.B. die Wahl der Verteilungsfunktion und Parameterschätzmethode und den jeweils vorhandenen Daten (DvWK 1999). Es ist anzunehmen, dass mit der erweiterten Informationsgrundlage in dem hier vorgeschlagenen Ansatz die getroffenen Annahmen auf ein besseres hydrologisches Fundament gestellt werden können. Geht man davon aus, dass ein Konsens in der Hydrologie über die Wirkung hydrologischer Prozesse und deren Erfassbarkeit in Modellen und Daten vorhanden ist, so sollte die hier vorgeschlagene Vorgangsweise in der Tat weniger subjektiv sein als das traditionelle formale Verfahren der Extremwertstatistik, das nur auf einer beschränkten Informationsgrundlage beruht.

Allerdings erfordert die Vorgangsweise einen großen Arbeitsaufwand, der nicht so sehr in der Anwendung verschiedener statistischer Verfahren liegt, sondern in einer hydrologischen Analyse, Interpretation und Argumentation. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse im Gebiet ist dafür Voraussetzung. Der Einsatz wird aber als notwendig erachtet, um die vielfältigen Aspekte der Hochwasserentstehung zu berücksichtigen und die Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf eine zuverlässige Basis zu stellen.

Discussion and conclusions

The idea of the approach presented here is the inclusion of additional temporal, spatial and causal information to achieve a more precise description of the runoff processes in river basins than is possible by a purely statistical analysis of observed flood peaks. The application of this approach in Austria showed that these additional information sources identify various aspects of flood generation and give valuable insights into the behaviour of floods. In the given example, the different independent sources of information supplement each other, so that a more reliable estimate of flood probabilities can be expected than is achievable by conventional flood statistics that rely on analyses of observed flood peaks alone.

The approach presented here may thus serve as an example for the determination of flood probabilities in other river basins. The type and the scope of methods and analyses used depend on the availability of data and information from the basin under study and the prevailing hydrological processes there. This paper presents examples of useful information sources and processes. Such additional, often essential, processes are, e.g., retention of lakes and effects of water-management activities. Processes such as these have been considered by MERZ et al. (2008) too. Generally, the processes and the data that are typically available differ depending on the basin size. In smaller catchments, for instance, the formation of water-saturated areas may be relevant, while in larger catchments flood plain retention can be more important. „Silent witnesses“ like geo-morphological indicators can yield valuable information in small basins whereas, in large basins, comparisons with upstream and downstream gauges and flood marks may be more useful. It seems to be

essential to include additional information of all three types (temporal, spatial, and causal), so that uncertain single pieces of information may corroborate each other.

The proposed method of combining different sources of information by expert judgement has a certain degree of subjectivity, but it has the advantage of taking aspects and interactions into account that are difficult to formalize mathematically. Much of the knowledge available, such as an assessment of the morphology and the landform (AULITZKY 1992) can only give a qualitative, plausible judgement of flood behaviour. Since many formalized methods depend on quantitative inputs, such important qualitative information cannot be directly incorporated. A formal procedure that is suitable for combining quantitative with qualitative information is Bayes statistics.

Moreover, many formal procedures may not be fully objective as they are based on subjective assumptions such as the choice of the distribution function, the method of parameter estimation (DvWK 1999). It can be expected that the expansion of the information by the approach presented here will allow for more reliable results. Given that there is a general agreement among hydrologists about the functioning of hydrological processes and ways of presenting them by models, the proposed procedure should be considered to be less subjective than the conventional formal approach of extreme-value statistics that rests on limited data and a particular choice of estimation methods.

The proposed method is labour intensive not so much regarding the application of different statistical methods, but in terms of hydrological analysis, interpretation, and reasoning. Prior knowledge about the characteristics of hydrological processes in the catchment examined is hence important. The use of this new approach is considered necessary in order to take the diverse aspects of flood generation into account and to provide a sound basis for estimating of flood probabilities.

Danksagung

Für finanzielle Unterstützung wird der Österreichischen Akademie der Wissenschaften für ein APART [AUSTRIAN PROGRAMME FOR ADVANCED RESEARCH AND TECHNOLOGY] Stipendium und dem Fonds zur wissenschaftlichen Förderung (FWF) Projekt. P18993-N10 gedankt. Dem Hydrographischen Zentralbüro Wien und den hydrographischen Landesdiensten Österreichs wird für die Bereitstellung der hydrologischen Basisdaten und die konstruktive Zusammenarbeit gedankt. Die Autoren sind O. Univ. Prof. Dr. D. Gutknecht für wertvolle Diskussionen zur Philosophie der prozessorientierten Modellierung zu Dank verpflichtet.

Anschrift der Verfasser:

Dr. R. Merz
Univ.Prof. Dr. G. Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222
A-1040 Wien
merz@hydro.tuwien.ac.at

Literaturverzeichnis

- AULITZKY, H. (1992): Die Sprache der „Stummen Zeugen“. – In: Internationales Symposium Interprevent 1992 Bern. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen. Tagungspublikation, Band 6. Klagenfurt, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, S. 139-174
- BAYLISS, A. & D. REED (2001): The use of historical data in flood frequency estimation. Report to MAFF. – Centre for Ecology

- and Hydrology, Wallingford. http://www.nwl.ac.uk/ih/feh/historical_floods_report.pdf
- BLÖSCHL, G. (2005): Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. – In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M.G. Anderson (Managing Editor). – J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080
- BLÖSCHL, G. (2007): Einsatz von Simulationsmethoden bei der Bestimmung extremer Abflüsse. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S. 227-246)
- BLÖSCHL, G., C. RESZLER & J. KOMMA (2008): A spatially distributed flash flood forecasting model. – *Environmental Modelling & Software*, 23, 464-478
- BLÖSCHL, G. & R. MERZ (2008): Landform – hydrology feedbacks. – *Proceedings of the International Symposium: Landform – structure, evolution, process control*. – Springer Verlag, Berlin (im Druck)
- BURN, D.H. (1990): Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. – *Water Resour. Res.*, 26(10), 2257-2265
- DALRYMPLE, T. (1960): *Flood Frequency Analysis*. – Water Supply Paper 1543_a. – US Geol. Survey, Reston, VA.
- DÜSTER, H. (1994): Die Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. – Diss. Univ. Bern, 203 pp.
- DVWK (1999): *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*. – Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, Bonn (DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H 251)
- DYCK, S. (1980): *Angewandte Hydrologie, Teil 1*. – Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München, 528 pp.
- GODINA, R. (1998): *Berechnung des Bemessungshochwassers*. Kursunterlagen. ÖWAV-TU Wien-Kurs: „Berechnung des Bemessungshochwassers“. – Technische Universität Wien
- GRÜNEWALD, U. (2006): Kann der Schlüssel zur wasserwirtschaftlichen Zukunft allein in der relativ kurz beobachteten Vergangenheit gesucht werden? – In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 15.06, DWA, Bd. 2, S. 303-313
- GRÜNEWALD, U. (2007): Zur Einbeziehung historischer hydrologischer Extremereignisse – Erfahrungen aus dem Elbegebiet. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S. 7-16)
- GUTKNECHT, D. (1994): Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. – *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 46(3-4), 50-57
- GUTKNECHT, D. (2007): Bestimmungsmethoden – Überblick. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S. 155-180)
- GUTKNECHT, D., G. BLÖSCHL, Ch. RESZLER & H. HEINDL (2006): Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58, H 3/4, pp. 44-50
- GUTKNECHT, D., Ch. RESZLER & G. BLÖSCHL (2002): Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. – *e&i elektrotechnik und informationstechnik*, 119(12), pp. 411-413
- HIRSCHBOECK, K.K. (1988): Flood hydroclimatology. – In: Baker, V.R., Kochel, R.C. and Patton, P.C., eds., *Flood Geomorphology*. – John Wiley & Sons, Chichester, 27-49
- HOSKING, J.R.M. & J.R. WALLIS (1997): *Regional Frequency Analysis*. – Cambridge University Press, Cambridge
- HURST, H.E. (1951): Long-term storage capacity of reservoirs. – *Trans. Am. Soc. Eng.* 116, 770-808
- IH (1999): *Flood Estimation Handbook*. – Institute of Hydrology, Wallingford, UK
- KOMMA, J., Ch. RESZLER, G. BLÖSCHL & T. HAIDEN (2007): Ensemble prediction of floods – catchment non-linearity and forecast probabilities. – *Nat. Hazards and Earth System Sciences*, 7, pp. 431-444
- LUFT, G., J. IHRINGER, R. BECKER, R. BRUNNER, S. HARLOS, H. KIEFER, R. MERZ, H.-P. NEFF, D. MARUSIC, U. HÖNIG & M. CASPER (1999): *Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg*. – Handbuch Wasser, Oberirdische Gewässer/Gewässerökologie. – Landesanstalt f. Umweltschutz Baden-Württemberg, LfU Karlsruhe, Band 54
- MARKART, G., B. KOHL, B. SOTIER, T. SCHAUER, G. BUNZA & R. STERN (2004): *Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetations-einheiten bei konvektiven Starkregen*. – BFW Report 3: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 83 pp.
- MEON, G., M. ANHALT, J. IHRINGER & J. HÖFER (2007): Risikobasierte Verfahren zur Hochwasserbemessung von Stauanlagen. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S.101-115)
- MERZ, R. (2007): Hochwasserstatistik – das Ausreißerproblem. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S. 181-194)
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2003): A process typology of regional floods. – *Water Resour. Res.*, 39(12), 1340, doi:10.1029/2002WR001952
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2005): Flood Frequency Regionalisation – spatial proximity vs. catchment attributes. – *Journal of Hydrology*, 302 (1-4), 283-306
- MERZ, R., G. BLÖSCHL & G. HUMER (2008): National flood discharge mapping in Austria. – *Nat. Hazards*. doi 10.1007/s11069-007-9181-7
- MERZ, R., G. BLÖSCHL & D. PARAJKA (2006): Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(1), S. 2-11
- MERZ, R., G. BLÖSCHL & U. PLOCK-ELLEN (1999a): Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich. – *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51, Heft 11/12, pp. 291-305
- MERZ, R., U. PLOCK-ELLEN, G. BLÖSCHL & D. GUTKNECHT (1999b): Seasonality of flood processes in Austria. – In: L. Gottschalk, J.C. Olivry, D. Reed and D. Rosbjerg (Eds.) *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*. – Proc. Birmingham, UK, Symp., July 1990. – IAHS Publ. no. 255, pp. 273-278
- MUDELSEE, M., M. BÖRNGEN, G. TETZLAFF & U. GRÜNEWALD (2004): Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathways „Zugstrasse Vb“. – *J. Geo. Res.*, 109, doi:10.1029/2004D005034
- RESZLER, Ch., G. BLÖSCHL & J. KOMMA (2008): Identifying runoff routing parameters for operational flood forecasting in small to medium sized catchments. – *Hydrological Sciences Journal* 53, pp 112-129
- SCHUMANN, A.H. (2005): Hochwasserstatistische Bewertung des Augsthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der saisonalen Statistik. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 49(4), S. 200-206
- SCHUMANN, A. & B. PFÜTZNER (2002): Regionalized Flood Estimation at ungauged sites supported by GIS. – *Proceedings of an International Conference on Flood Estimation*, Berne, März 6-8, 2002, International Commission for the Hydrology of the Rhine basin. – CHR Report II-17, Swiss Federal Office for Water and Geology, S. 669-677
- SIVAPALAN, M., G. BLÖSCHL, R. MERZ & D. GUTKNECHT (2005): Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. – *Water Resour. Res.*, 41, W0612, doi:10.1029/2004WR003439
- SKØIEN, J., R. MERZ & G. BLÖSCHL (2006): Top-kriging – geostatistics on stream networks. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 277-287
- STEDINGER, J.R., R.M. VOGEL & E. FOUFOULA-GEORGIU (1993): Frequency analysis of extreme events. – Ch. 18 in *Handbook of Hydrology*, edited by D. R. Maidment. – McGraw-Hill, New York
- WIESBAUER, H. (2007): Historische Überflutungen am Kamp. – In: *Extreme Abflussereignisse* (Hrsg. D. Gutknecht). – Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (Wiener Mitteilungen 206, S. 43-58)