

REGIONALISIERUNG VON STATISTISCHEN HOCHWASSERKENNGRÖSSEN

Ralf Merz

1. Einleitung

Methoden der Regionalisierung von Hochwässern dienen dazu, für Gebiete ohne Abflussbeobachtungen Hochwasserkenngößen zu bestimmen und für Gebiete mit Abflussbeobachtungen, die aus den Beobachtungen ermittelten Werte zu verbessern. Gerade die Hochwasserkatastrophen der jüngsten Vergangenheit in Österreich und den Nachbarländern haben die Bedeutung flächendeckender Hochwasserkenngößen verdeutlicht. Viele verschiedene Verfahren zur Regionalisierung von Hochwässern wurden entwickelt, die sich aufgrund der Art der verwendeten Information, ihrer Komplexität und nach dem Ausmaß, in dem ein Vorwissen über die maßgebenden hydrologischen Prozesse einbezogen werden, unterscheiden. Der vorliegende Beitrag soll einen kurzen Überblick über Regionalisierungsmethoden von statistischen Hochwasserkenngößen, die in der Praxis anwendbar und für Österreich besonders interessant sind, geben.

Im Blickpunkt dieses Beitrages sind Regionalisierungsverfahren, die statistische Hochwasserkenngößen von beobachteten Gebieten auf unbeobachtete Gebiete übertragen. Als beobachtete Gebiete werden hier jene Gebiete bezeichnet, für die gemessene Abflussdaten vorliegen. Für unbeobachtete Gebiete liegen keine gemessenen Abflussdaten vor, jedoch können Beobachtungen anderer hydrologischer Größen wie z.B. Niederschlag vorhanden sein.

Statistische Hochwasserkenngößen, für deren Regionalisierung in diesem Beitrag Methoden beschrieben werden, können Momente der Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilung, wie z.B. Mittelwert, Varianz bzw. Variationskoeffizient (CV) und Schiefe (CS), sowie Quantile des Abflussscheitels einer bestimmten Jährlichkeit, wie z.B. HQ₃₀ oder HQ₁₀₀ sein.

Neben der Übertragung von Hochwasserkenngößen von beobachteten auf unbeobachtete Gebiete, ist die Modellierung des Niederschlag-Abfluss Prozesses eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Hochwasserkenngößen in unbeobachteten Gebieten. Da hierbei der Hochwasserabfluss mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluss Modells unter Verwendung von (regionalisierten) Niederschlagskennwerten und (regionalisierten) Ereigniskenngrößen ermittelt wird, sei der interessierte Leser auf Weilguni (2006) und Merz (2006) verwiesen.

2. Ermittlung von Hochwasserkenngößen in beobachteten Gebieten

Da bei der Regionalisierung Hochwasserkenngößen in beobachteten Gebieten auf unbeobachtete Gebiete übertragen werden, hängt die Güte der regionalisierten Werte von zwei Faktoren ab; erstens wie gut die Kenngrößen räumlich übertragen werden, aber auch wie genau die Hochwasserkenngößen in beobachteten Gebieten ermittelt

werden können. Daher wird im folgenden kurz darauf eingegangen, wie die Schätzung von Hochwasserkenngrößen in beobachteten Gebieten verbessert werden kann.

Traditionell werden für Pegel mit Abflussbeobachtungen die statistischen Momente aus den beobachteten Hochwasserscheiteln berechnet um daraus, nach Wahl der Verteilungsfunktion, Hochwasserquantile bestimmter Jährlichkeiten zu ermitteln. Im Einzelfall können die so berechneten Hochwasserwerte jedoch sehr ungenau sein. Einerseits können die Beobachtungswerte aufgrund der erschwerten Messbedingungen (z.B. Umfließen des Pegels) im Hochwasserfall fehlerhaft sein. Andererseits spiegeln die beobachteten Hochwässer in der Regel nur einen Teil aller möglichen Hochwässer im Gebiet wider. Abschätzungen des Hochwasserverhaltens, nur auf Grundlage der Beobachtungsdaten sind daher besonders bei kurzen Reihen oder großen Jährlichkeiten unsicher, da hier über den Bereich des bisher Beobachteten hinaus extrapoliert werden muss. Bei großen Jährlichkeiten kommt hinzu, dass sich die Abflussprozesse bei Extremereignissen gegenüber den üblicherweise beobachteten Hochwässern stark ändern können. Sinnvoll ist es daher, Informationen über die Entstehung der Hochwässer im betreffenden Gebiet in die Berechnung einfließen zu lassen. Zusatzinformationen, um die lokale Schätzung von Hochwasserkenngrößen zu verbessern, können in zeitliche, räumliche und kausale Informationen unterschieden werden.

Zeitliche Informationen können aus Untersuchungen über Klimafluktuationen, Einschätzung der Jährlichkeit des größten beobachteten Hochwassers und Informationen über historische Hochwässer erhalten werden. Das Hochwasserverhalten in Gebieten ist ein zeitlich dynamischer Prozess. Außerordentlich große Ereignisse treten vielfach in Clustern von einigen wenigen Extrem-Jahren auf und dann für lange Zeit nicht mehr. Beispiele sind dafür die Extremereignisse der letzten Jahre, aber auch Gruppen von Hochwasserjahren in der Vergangenheit wie etwa die Jahre 1965/66 mit außerordentlich großen Hochwässern in Kärnten oder die Jahre 1954 bis 1959 und 1897 bis 1899 im österreichischen Donaeinzugsgebiet. Erstreckt sich eine Beobachtungsreihe nur über einen Zeitraum mit wenigen bzw. sehr vielen Extrem-Jahren, so spiegelt die Beobachtungsreihe nicht die Grundgesamtheit wider und daraus abgeleitete Hochwasserkenngrößen können das Hochwasserverhalten vielfach über- bzw. unterschätzen. Klimaschwankungen können durch einen Vergleich mit längeren Beobachtungsreihen von benachbarten Gebieten berücksichtigt werden. Einen formalen Ansatz zur Berücksichtigung von Klimaschwankungen ist im Flood Estimation Handbook (IH, 1999) zu finden.

Ist bei einem beobachteten Kollektiv der Größtwert wesentlich größer als die anderen Werte (Ausreißer), so sollte diesem Größtwert nicht automatisch eine empirische Wahrscheinlichkeit (Plotting Position) zugewiesen werden. Vielmehr ist eine detailliertere Einschätzung der Jährlichkeit des Größtwertes durch Ereignisanalyse und Vergleich mit Nachbarstationen, naheliegend. Analysen historischer Hochwässern sind hierbei eine wertvolle Hilfe. Neben der Einordnung von Ausreißern sind Analysen historischer Hochwässern auch im Hinblick auf die Extrapolation zu höheren Jährlichkeiten lohnenswert.

Räumliche Information zur Verbesserung der Hochwasserabschätzung erhält man durch einen Vergleich mit Nachbarstationen. Sind Klima und naturräumliche Gegebenheiten innerhalb einer Region ähnlich, so sind für Gebiete in der Region ein ähnliches Hochwasserverhalten und damit ähnliche statistische Hochwasserkenngößen, zu erwarten. So kann z.B. ein Vergleich mit Unter- und Oberliegerpegeln im Form einer Bilanzierung des Durchflusses die Unsicherheit der lokalen Schätzung erheblich reduzieren. Weitere Möglichkeiten zur regionalen Abschätzung sind die im folgenden Kapitel beschriebenen Regionalisierungsverfahren, wie z.B. regionale Spendendiagramme.

Kausale Information zur Verbesserung der Hochwasserabschätzung erhält man durch Analyse der Prozesse der Hochwasserentstehung. Ein Beispiel hierfür ist die Analyse von Abflussbeiwerten von beobachteten Hochwässern. Hierzu können Abflussbeiwerte von ausgewählten Hochwasserereignissen der Beobachtungsreihe ermittelt werden bzw. auf die Datenbasis von Merz et al. (2006) zurückgegriffen werden. In Merz et al. (2006) wurden Abflussbeiwerte von ca. 50000 Ereignissen in 326 österreichischen Einzugsgebieten mit einer Flächen von 80 bis 10000 km² für den Zeitraum 1981-2001 ausgewertet. Unter den ausgewerteten Abflussereignissen waren 3032 Hochwasserereignisse mit dem größten jährlichen Scheitelwert. In den niederschlagsreichen und damit meist sehr feuchten Gebieten sind die Abflussbeiwerte der jährlichen Hochwässer in der Regel sehr hoch. Diese deuten auf eine stetig hohe Abflussbereitschaft der Gebiete hin. Große Hochwässer unterscheiden sich somit von kleineren Hochwässern nur durch die Größe des Niederschlages. Es ist somit eine eher kleinere Schiefe der Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilung zu erwarten. In trockeneren Gebieten sind die Abflussbeiwerte meistens klein. 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 Gebiet ist mit einer wesentlich größeren Schiefe der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen.

Ein weiteres Beispiel kausaler Information ist die Einbeziehung von Niederschlag zur Abschätzung von Hochwasserkenngößen. Ein einfaches und robustes Verfahren zur Abschätzung von Bemessungshochwässern mit gegebener Jährlichkeit unter Verwendung von Niederschlagsdaten ist das Gradex-Verfahren (Merz et al., 1999). Der Ansatz des Gradex-Verfahrens besteht aus einer Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einer Hochwasserstatistik durch ein einfaches Niederschlag-Abflussmodell. Ab einem Hochwasser einer festgelegten Jährlichkeit, z.B. 10 Jahre, wird im Gradex-Verfahren eine vollständige Sättigung des Gebiets angenommen. Jeder zusätzliche Niederschlag, d.h. Niederschlag einer größeren Jährlichkeit, trägt zur Gänze zu einem zusätzlichen Abfluss bei. Das Hochwasserverhalten jenseits dieser Jährlichkeit kann somit aus dem Niederschlagsverhalten geschätzt werden. Durch die Annahme einer vollständigen Sättigung stellen die Werte aus dem Gradex-Verfahren im Allgemeinen eine obere Schranke der Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Österreich dar (Merz et al., 1999).

Eine weitere mögliche kausale Informationsquelle ist die Hochwassertypologie von Merz und Blöschl (2003). Hier wurden 11518 Hochwasserereignisse in Österreich in Hinblick auf ihre Entstehungsmechanismen untersucht und in vier Typen klassifiziert: Hochwässer zufolge langer Niederschläge, Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, Hochwässer aufgrund von Gewittern, Regen-auf-Schnee Ereignisse und Schneeschmelzhochwässer. Die statistischen Eigenschaften der Hochwasserkollektive, aufgegliedert nach Prozesstypen, zeigen deutliche Unterschiede. Bei Einzugsgebieten mit häufigen Gewittern ist eine große Schiefe zu erwarten, bei Einzugsgebieten mit einem großen Anteil an Schneeschmelzhochwässern sind die Variationskoeffizienten und Schiefen eher kleiner.

Kausale Informationen erhält man auch durch die Analyse der Form der Hochwasserwelle von ausgewählten Ereignissen bzw. durch die subjektive Einschätzung des Hochwasserverhaltens aufgrund der Gebietskenntnis. Morphologie und Bewuchs können beispielsweise Aufschluss über das Hochwasserverhalten geben. So deutet ein bemooster Gewässerlauf auf eine langsame Abflussreaktion und deshalb kleine Hochwasserspenden hin. Erosion lässt auf schnelle Abflussreaktion und große Hochwasserspenden schließen.

Ein Computerprogramm zur lokalen Hochwasserstatistik, der Analyse von Abflussbeiwerten und Prozesstypen von Hochwasserereignissen und des Gradex-Verfahrens für über 900 österreichische Pegelgebiete ist am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien verfügbar.

Durch Einbeziehen von Zusatzinformation, wie oben beispielhaft beschrieben, kann die Abschätzung von statistischen Hochwasserkenngrößen oft deutlich verbessert werden. Besonders die Abschätzung des Hochwasserverhaltens bei geringerer Auftretenswahrscheinlichkeiten, d.h. die höheren Momente der Verteilungsfunktion, sollte durch Zusatzinformationen gestützt werden. Das mittlere Hochwasserverhalten, d.h. der Mittelwert der Verteilung kann schon ab wenigen Beobachtungsjahren aus den beobachteten Daten ermittelt werden.

Ein vielfach diskutierter Punkt der Hochwasserstatistik ist die Wahl einer geeigneten Verteilungsfunktion. Die Wahl der Verteilungsfunktion ist dann wichtig, wenn die Verteilungsfunktion an die beobachteten Daten angepasst wird. Hiermit sind die Parameter der Verteilung gegeben und nur der Verteilungstyp beeinflusst den Wert des Hochwasserabflusses bei gegebener Jährlichkeit. Lässt man jedoch aufgrund der Zusatzinformation eine hydrologisch plausible Abweichung der gewählten Verteilung von den Beobachtungsdaten zu, so hat die Bestimmung der Parameter der Verteilung eine viel größere Bedeutung. Die 3-parametrische Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) liefert im Allgemeinen in Österreich gute Ergebnisse. Werden die Verteilungsparameter hydrologisch gewählt und nicht nur den Beobachtungsdaten angepasst, ist sie flexibel genug, unterschiedliches lokales Hochwasserverhalten zu beschreiben.

3. Regionalsierungsmethoden

Sind Hochwasserabflüsse einer bestimmter Jährlichkeit Ziel der Regionalisierung, so können die T-jährlichen Hochwasserquantile direkt für das unbeobachtete Gebiet geschätzt werden. Eine zweite Möglichkeit ist die Regionalisierung der Momente der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve mit einer anschließenden Schätzung der T-jährlichen Hochwasserquantile mittels einer Extremwertverteilung. Bei einer direkten Schätzung der Hochwasserquantile ist es möglich, dass die Hochwasserquantile nicht konsistent sind, d.h. ein Abfluss kleinerer Jährlichkeit größer ist als ein Abfluss mit größerer Jährlichkeit. Ebenso muss jedes Hochwasserquantil regionalisiert werden, während bei der Momentenregionalisierung maximal die Anzahl der Parameter der Extremwertverteilung bestimmend ist.

Viele Regionalisierungsmethoden beruhen auf der Differenz von Abflusskenngrößen zwischen Gebieten. Besonders große Werte haben daher einen größeren Einfluss auf die Schätzung. Um diesen Einfluss zu beschreiben, können die Abflusswerte transformiert werden. Ein häufiges Beispiel dafür ist die logarithmische Transformation des Mittelwertes des Hochwasserkollektives.

3.1 Hüllkurven und empirische Formeln

Ein sehr einfaches und früher weit verbreitetes Verfahren zur Regionalisierung von Hochwasserkennwerten sind Hüllkurven der Hochwasserabflüsse. Hierbei werden die größten beobachteten Hochwasserabflüsse in einer Region gegen die Gebietsgröße aufgetragen (Wundt, 1949). Die Hüllkurve ist jene Kurve, die gerade über allen beobachteten Ereignissen liegt. Die Hüllkurve ist somit ein erstes Maß für den maximalen Hochwasserabfluss, der in dieser Region zu erwarten ist. Die Aussagekraft dieses Maßes hängt davon ab, wie viele maximale Hochwasserabflüsse mit verschiedenen Ursachen der Hochwasserentstehung beobachtet wurden. Den Werten der Hüllkurve ist jedoch keine Wahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit zugeordnet, was den Gebrauch von Hüllkurven für Bemessungszwecke stark einschränkt. In Abb. 1 sind die maximal beobachteten Abflüsse von 570 österreichischen Pegeln für den Beobachtungszeitraum 1871 bis 2005 aufgetragen. Es zeigt sich eine sehr weite Streuung. So ist für ein Gebiet von ca. 100 km² der niedrigste Wert etwa 4 m³/s, der größte beobachtete Wert für diese Gebietsgröße ist über 200 m³/s.

Aus den Hüllkurvenuntersuchungen entwickelten sich einfache empirische Ansätze zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen unbeobachteten Einzugsgebieten. Viele dieser Formeln werden im Bereich von Wildbächen schon seit langem angewandt. In diesen Formeln wird der Hochwasserabfluss in der Regel als Funktion der Gebietsfläche und mehrerer Koeffizienten berechnet, z.B. in der 90%-Abflussformel nach Wundt (1949):

$$HQ = 13.8 \cdot A_E^{0.6} \quad (1)$$

wobei A_E die Einzugsgebietsfläche (km²) ist. Diese Ansätze sind sehr einfach anzuwenden.

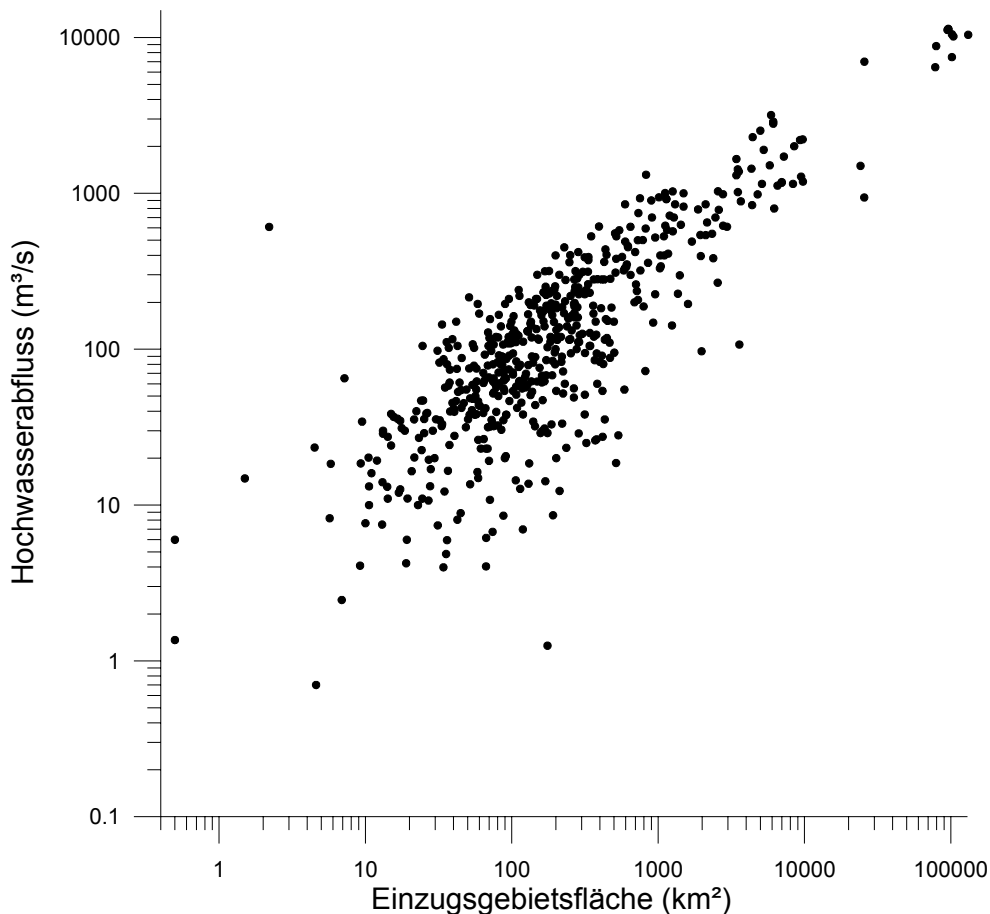


Abb. 1: Maximal beobachteter Abfluss (m³/s) für 570 österreichische Pegel der Jahre 1871 bis 2005.

Andere Formeln, wie z.B. Hofbauer (1916) (in Hagen, 2005)

$$HQ_{\max} = 60 \cdot \alpha \cdot A_E^{0.5} \quad (2)$$

erlauben durch gebietsabhängige Koeffizienten, hier Koeffizient α , eine Anpassung an lokale Verhältnisse. Viele neuere Formeln enthalten auch Angaben zum Ereignisniederschlag (Hagen, 2005). Eine Verwendung dieser Formeln ohne Kenntnis der Abläufe im Gebiet ist als sehr kritisch anzusehen (Hagen, 2005). Viele dieser Formeln überschätzen den Hochwasserabfluss sehr stark. Ebenso ist, wie für die Hüllkurven, die Jährlichkeit der so ermittelten Spitzenabflüsse in der Regel nicht definiert.

3.2 Hydrologische Längenschnitte

Beim hydrologischen Längenschnitt werden beobachtete Hochwasserkennwerte gegen die Lauflänge aufgetragen (Abb. 2). Zwischen den beobachteten Stellen wird in der Regel linear interpoliert. Je nach Gebietskenntnis können jedoch auch Knickstellen eingeführt werden. Bei Zuflüssen entstehen vertikale Sprünge in der Höhe der Abflussmenge des Zuflusses. Durch die graphische Darstellung des Abflusses mit der Flusslauflänge erlauben hydrologische Längenschnitte eine bessere subjektive Einschätzung des Abflusses zwischen beobachteten Stellen und erleichtern

Bilanzüberlegungen. Durch die Bilanzüberlegungen ist es auch möglich, Fehler in den beobachteten Abflussdaten zu erkennen.

Hydrologische Längenschnitte eignen sich für die Bestimmung von Hochwässern an unbeobachteten Stellen von größeren Flüssen, wenn die Flächenzunahme entlang des Flusslaufes klein gegenüber den Gebietsflächen ist. Für kleinere Flüsse, bei denen lokale Effekte eine starke Veränderung im Abflussverhalten entlang des Flusslaufes hervorrufen können, sind Längenschnitt weniger geeignet. Da hydrologische Längenschnitte in erster Linie graphische Darstellungen der Abflussveränderung entlang von Gewässerläufen sind, kann ohne zusätzliche Information nicht weit über die letzte Beobachtungsstelle hinaus extrapoliert werden.

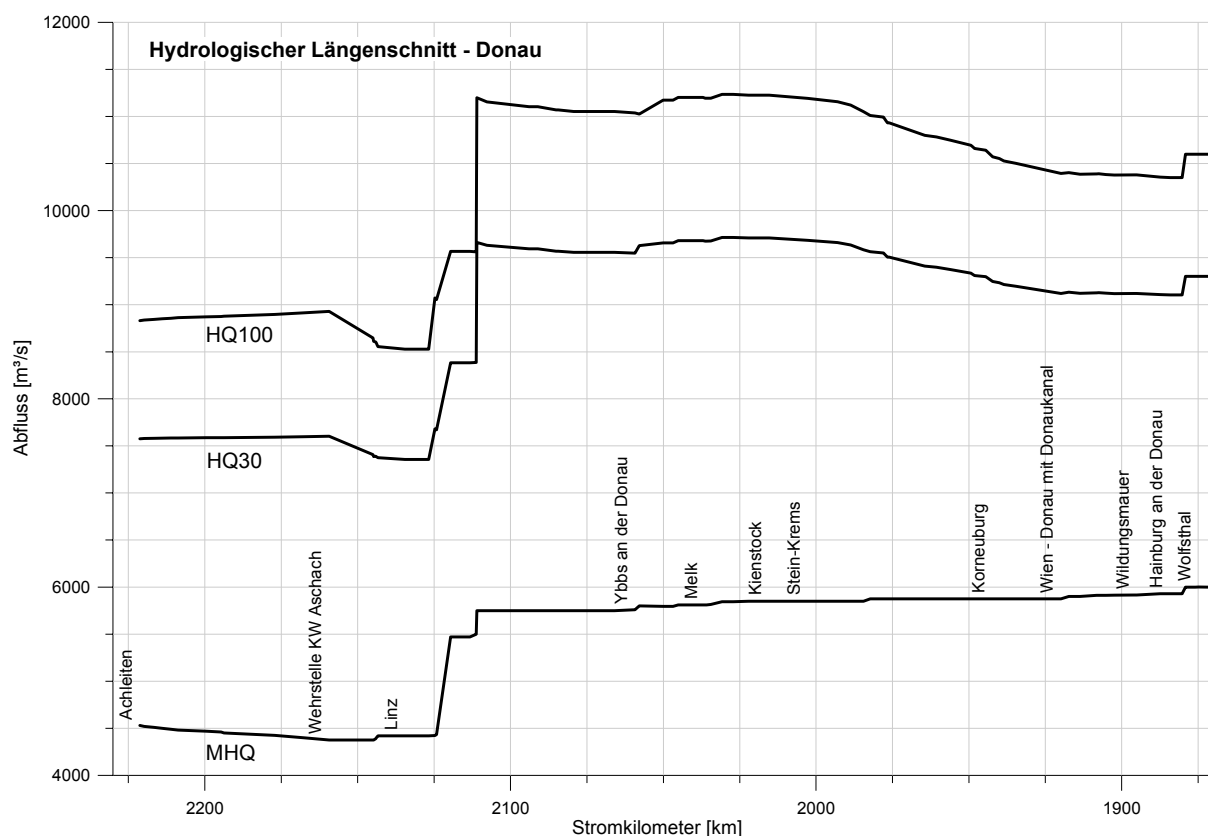


Abb. 2: Hydrologischer Längenschnitt der österreichischen Donau für das mittlere jährliche Hochwasser, Hq_{30} und Hq_{100} .

3.3 Regionale Ansätze/Gruppierungsmethoden

Das wohl weit verbreitetste Verfahren zur räumlichen Übertragung von Hochwasserkennwerten ist die Ausweisung von „homogenen“ Regionen, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Die Idee des Ansatzes ist, dass die Daten aller Einzugsgebiete innerhalb einer homogenen Region zusammengefasst (d.h. gepoolt) werden, um damit die Aussagekraft über das Hochwasserverhalten zu steigern. Wenn etwa 5 Gebiete mit je 30 Jahren zusammengefasst werden, so entspricht dies (unter Annahme der Homogenität und statistischen Unabhängigkeit) einem Kollektiv von 150 Jahren.

Einfache Regionalisierungsverfahren, die auf dieser Idee aufbauen sind regionale Spendendiagramme. Hierzu werden Pegelgebiete zu Regionen bzw. Gruppen zusammengefasst. Für jede Region werden die Hochwasserkennwerte als Spenden (z.B. MHq, Hq₁₀₀) gegen die Gebietsfläche graphisch aufgetragen (Abb. 3). Ist das Hochwasserverhalten der Gebiete in dieser Region ähnlich, so nimmt die Hochwasserspende mit der Gebietsfläche in ähnlicher Weise ab.

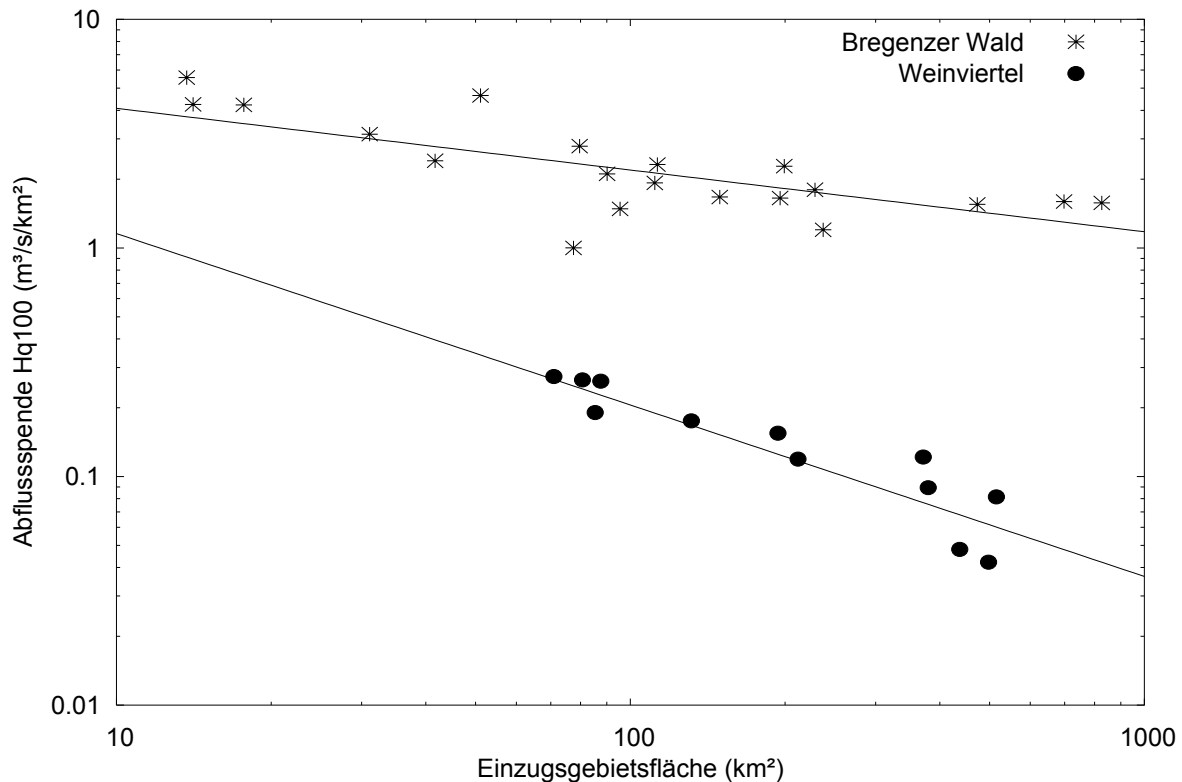


Abb. 3: Spendendiagramm der Regionen Bregenzer Wald und Weinviertel für die 100 jährliche Abflusspende. Die Linien stellen die mittlere Abnahme der Spenden mit der Gebietsfläche dar.

In Abb. 3 sind die 100 jährlichen Abflusspenden der Pegel im Bregenzer Wald und im Weinviertel gegen ihre Einzugsgebietsfläche aufgetragen. Die Regionen zeigen ein stark unterschiedliches Verhalten. Die Gebiete in der feuchten Region des Bregenzer Waldes (mittlerer Jahresniederschlag > 2000mm/Jahr) haben durchwegs höhere Abflusspenden als die trockeneren Gebiete im Weinviertel (mittlerer Jahresniederschlag < 600mm/Jahr). Ein deutlicher Unterschied ist auch in der mittleren Abnahme der Spenden mit der Gebietsfläche, gekennzeichnet durch die schwarzen Linien, zu sehen. Im Weinviertel nehmen die Spenden mit der Gebietsfläche deutlich stärker als im Bregenzer Wald ab. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen hochwasserauslösenden Prozesse zurückzuführen. Der Bregenzer Wald stellt eine orographische Sperre der von Nordwesten herströmenden feuchten Luftmassen dar. Dadurch sind großräumige längere Niederschlagsereignisse die dominierenden Hochwasserprozesse in dieser Region. Durch den großräumigen gleichmäßigen Niederschlag weisen kleinere Gebiete eine ähnliche Hochwasserspende wie größere

Gebiete auf. Im trockenen Weinviertel hingegen, sind oft konvektive Niederschlagsereignisse für Hochwässer ausschlaggebend. Durch die ungleichmäßige Überregnung haben kleinere Gebiete eine oft deutlich höhere Spende als größere Gebiete. Die Steigung der Hochwasserabflussspende ist also ein Indikator für die dominanten Prozesse.

Für regionale Spendendiagramme sollten jene Gebiete zusammengefasst werden, die ein einheitliches Hochwasserverhalten zeigen. Im Allgemeinen erfolgt dies durch Bildung geographischer Regionen mit ähnlichen klimatischen und naturräumlichen Verhältnissen. Aus dem mittleren Verhalten der beobachteten Gebiete einer Region können nun Werte für unbeobachtete Gebiete abgelesen werden.

Die bekannteste Methode, welche auf die Bestimmung homogener Regionen (im Englischen oft „Pooling Group“ genannt) beruht, ist die „Index flood method“ (Dalrymple, 1960; Flood Studies Report, 1975). Die Index flood Methode besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt werden homogene Regionen gefunden. In einem zweiten Schritt werden die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven der Pegel innerhalb einer homogenen Region mit dem mittleren Jahreshochwasser (der Index flood) normiert und zu einer einzigen (dimensionslosen) regionalen Verteilung (der „growth curve“) zusammengefasst (gepoolt). Für Gebiete mit Abflussmessungen wird schließlich in einem dritten Schritt das aus den Abflussmessungen bestimmte mittlere Jahreshochwasser mit der „growth curve“ multipliziert, wodurch sich die gesuchten Hochwasserwerte ergeben. Für Gebiete ohne Abflussmessungen wird das mittlere Jahreshochwasser aus Beziehungen zu diversen Einzugsgebietscharakteristiken ermittelt.

Der kritische Punkt bei Gruppierungsansätzen ist die räumliche Abgrenzung der homogenen Regionen (pooling group). Die räumliche Abgrenzung der homogenen Regionen kann auf Basis zweier grundsätzlich unterschiedlichen Informationen erfolgen. Einerseits können homogene Regionen in Anlehnung an bekannte geographische Grenzen, wie Flussgebietsgrenzen, klimatische oder geologische Grenzen, festgelegt werden. Dies erfordert natürlich eine genaue Kenntnis der Hydrologie der Untersuchungsgebiete. Eine andere Möglichkeit ist die räumliche Abgrenzung der homogenen Regionen auf Basis von Einzugsgebietscharakteristiken. Hierbei wird zuerst festgelegt, welche Einzugsgebietskenngröße, wie z.B. Geologie, Niederschlagswerte oder Saisonalität hydrologischer Größen, bzw. welche Kombination von Einzugsgebietskenngrößen als Maß für ein ähnliches Hochwasserverhalten verwendet werden kann. In einem weiteren Schritt werden nun Gebiete in einer Weise zu homogenen Regionen zusammengefasst, dass die gewählten Einzugsgebietskenngrößen bzw. Kombinationen innerhalb einer Region möglichst ähnlich sind, sich jedoch zwischen den Regionen möglichst stark unterscheiden.

In der Literatur existieren eine Reihe von Methoden zur Bestimmung homogener Regionen, wie z.B. die Cluster-Analyse. Die Cluster-Analyse ist ein statistisches Verfahren um die Varianz innerhalb von Regionen zu minimieren und zwischen den Regionen zu maximieren. Die Cluster-Analyse ist bereits in vielen kommerziellen Statistikprogrammen enthalten und kann relativ leicht angewendet werden. Für andere

statistische Verfahren wie etwa die Methode von Wiltshire (1986a), bei der eine große Region in zunehmend kleinere Teilflächen unterteilt wird, bis die Variabilität der Gruppen (die in einer bestimmten Weise definiert wird) ein Minimum erreicht, sind keine fertigen Computercodes verfügbar.

In Abb. 4 ist das Ergebnis einer Clusteranalyse zur Bildung homogener Hochwasserregionen in Österreich dargestellt (Piock-Ellena et al., 1999). Die homogenen Regionen wurden durch Analyse der Ähnlichkeiten im saisonalen Verhalten der Jahreshochwässer und der mittleren monatlichen Abflüsse gefunden. Jede homogene Region ist durch ein eigenes Symbol gekennzeichnet. Durch Sterne werden jene hochalpinen Gebiete in Tirol gekennzeichnet, die eine hohe saisonale Variabilität von Hochwässern und mittleren Monatsabflüssen aufweisen. Hochwässer und hohe mittlere Monatsabflüsse treten nur im Sommer auf. Die ausgeprägte Saisonalität deutet auf den starken Einfluss von Gletscherschmelze auf das Hochwasser- und Abflussverhalten hin. Eine etwas geringere Saisonalität in den Hochwässern, als auch in den mittleren monatlichen Abflüssen, weisen jene Gebiete in Westösterreich auf, die durch ein x gekennzeichnet sind. Ebenso wie in den hochalpinen Gebieten ist das Maximum im Sommer, wenn auch etwas früher. Die Seehöhe der Gebiete ist etwas geringer und Hochwässer sind durch Schneeschmelze dominiert. Kreuze kennzeichnen jene niederen alpinen Gebiete, die eine weniger stark ausgeprägte Saisonalität aufweisen und ebenfalls durch Schneeschmelze beeinflusst sind. Gebiete am Alpennordrand, die durch Dreiecke gekennzeichnet sind, weisen eine schwache Saisonalität auf. Der Hauptunterschied zu den oben diskutierten Gebieten ist, dass hier die Hochwässer und höchsten Monatsabflüsse nicht immer zur gleichen Zeit im Jahr auftreten. Orographische Effekte haben hier einen großen Einfluss auf das Hochwasserverhalten. Schwarze Kreise im Südosten Österreichs kennzeichnen eine Region, die stark durch das Auftreten der Hochwässer im Herbst geprägt ist. Die drei Regionen mit den niederen Gebieten im Norden Österreichs sind durch eine schwache aber unterschiedliche Saisonalität geprägt. Die Cluster sind recht gut in Hinblick auf die hochwasserauslösenden Prozesse zu interpretieren. Die Regionen stimmen einigermaßen mit den unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten sowie mit den geologischen Verhältnissen überein. Auch die Ost-West Erstreckung mancher Regionen entspricht der Hauptorientierung der Alpen und ist durchaus plausibel.



Abb. 4: Homogene Hochwasserregionen in Österreich. Ermittelt durch eine Clusteranalyse der Saisonalität der Jahreshochwässer und der mittleren monatlichen Abflüsse (Piock-Ellena et al., 1999).

Nach der Bestimmung von Regionen sollte bei der Index flood Methode überprüft werden, inwieweit die Hochwasserkollektive in jeder Region als homogen angesehen werden können. In der Literatur stehen eine Reihe von Homogenitätstest zur Verfügung (z.B. Dalrymple, 1960; Wiltshire, 1986b; Lettenmaier et al., 1987; Hosking and Wallis, 1997). Dalrymple's Test z.B. untersucht die Steigung der stationsweisen Extremwertverteilungen, indem die einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren entsprechenden Abflußquantile HQ_{10} miteinander verglichen werden und überprüft wird, ob sie innerhalb bestimmter Konfidenzgrenzen liegen. Die Konfidenzgrenzen werden dabei als Funktion des Stichprobenumfanges bei einem Konfidenzniveau von 95% berechnet. Wiltshire's Test ist dagegen nicht nur auf ein bestimmtes Quantil beschränkt, sondern untersucht die Abweichungen der individuellen Verteilungen von der regionalen Verteilungskurve. Der Homogenitätstest von Hosking and Wallis (1997) beruht auf der Verwendung der L-Momente. Für die Berechnung der L-Momente und den Homogenitätstest sind Fortran Routinen verfügbar (Hosking, 2000).

Zur Bestimmung der regionalen dimensionslosen Verteilungsfunktionen (growth curves) für die einzelnen Regionen werden bei der Index flood Methode für jede Station die höheren Momente der Hochwasserkollektive berechnet und innerhalb der Region arithmetisch gemittelt. Um den Einfluss der Reihengänge zu berücksichtigen können die lokalen Momente bei der arithmetischen Mittelung mit der Messreihengänge gewichtet werden. Aus den regionalen Momenten können nun die Parameter der regionalen Kurve geschätzt werden. Die Ermittlung eines Hochwasserquantils innerhalb der Region erfolgt durch Kombination des lokalen Mittelwertes mit den regionalen höheren Momenten.

Eine Erweiterung der Methode der Bestimmung von homogenen Regionen ist der „Region of Influence“ (ROI) Ansatz (Burn, 1990). Beim ROI Ansatz wird für jedes Gebiet unabhängig seine eigene Region durch Definition eines Ähnlichkeitsmaßes bestimmt. Eine Region muss nicht geographisch zusammenhängend sein. Da für jedes Gebiet die Region unabhängig gewählt wird, kann Gebiet A in der Gruppe zur Bestimmung von Gebiet B sein, jedoch muss B nicht in der Gruppe zur Bestimmung von Gebiet A sein. Der erste Schritt des Verfahrens ist die Wahl eines Distanzmaßes, welches die hydrologische Ähnlichkeit zwischen Gebieten definiert. Das Distanzmaß D_{i0} zwischen Gebiet i und Gebiet 0 beruht im Allgemeinen auf Gebietseigenschaften, wie z.B. Niederschlag oder Geologie, und ist definiert als

$$D_{i0} = \left[\sum_{l=1}^L W_l (Y_l(\mathbf{x}_i) - Y_l(\mathbf{x}_0))^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

wobei W_l das Gewicht für die relative Bedeutung von Eigenschaft l aus L Eigenschaften und $Y_l(\mathbf{x}_i)$ der Wert der Eigenschaft l für Gebiet i ist. Jene Gebiete, die das kleinste Distanzmaß D_{i0} haben und somit als am ähnlichsten angenommen werden, bilden die Region für Zielgebiet 0 . Laut Empfehlungen des neuen Flood Estimation Handbook (IH, 1999, 3/p.169) sollte die Anzahl der Gebiete einer Region so gewählt werden, dass die Summe aller Beobachtungsjahre etwa fünfmal so groß wie die Jährlichkeit des zu bestimmenden Hochwassers ist. In einem zweiten Schritt wird die Homogenität der gewählten Region, z.B. nach Hosking und Wallis (1997), überprüft. Wird eine Region als sehr heterogen eingestuft, so wird das Gebiet mit dem größten Distanzmaß entfernt, und ein alternatives Gebiet in die Region aufgenommen. Danach wird der Homogenitätstest wiederholt. Nach der endgültigen Bestimmung der Region, werden regional gemittelte CV und CS ermittelt. Laut Flood Estimation Handbook (IH, 1999, 3/p.182) können die Gewichte anhand der beobachteten Reihenlänge und einem Ähnlichkeits-Ranking Faktor bestimmt werden. Der Mittelwert für unbeobachtete Gebiete wird durch eine Regression mit Gebietseigenschaften bestimmt.

3.4 Funktionale Zusammenhänge mit Gebietseigenschaften

Eine weit verbreitete Methode zur Regionalisierung von statistischen Hochwasserkenngrößen sind Regressionen mit Gebietseigenschaften (z.B. Düster, 1994; Luft et al., 1999; IH, 1999). Durch die Entwicklung Geographischer Informationssysteme (GIS) und digitalen Datenbasen in den letzten Jahren sind digitale Gebietseigenschaften regional verfügbar, welches die Anwendung von Regressionen für die Regionalisierung wesentlich erleichtert.

Ein Typ von Regressionsanalysen ist die lineare Mehrfachregression, bei der der zu schätzende Hochwasserkennwert $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ in Beziehung zu Gebietseigenschaften gesetzt wird:

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_0) = a + b \cdot Y_1(\mathbf{x}_0) + c \cdot Y_2(\mathbf{x}_0) + d \cdot Y_3(\mathbf{x}_0) \quad (4)$$

wobei $Y_1(\mathbf{x}_0)$, $Y_2(\mathbf{x}_0)$, $Y_3(\mathbf{x}_0)$ Gebietseigenschaften und a , b , c , d die Regressionskoeffizienten sind. Regressionsanalysen sind in vielen kommerziellen Statistikprogrammen enthalten und daher leicht anzuwenden. Für viele Regionen z.B. England (IH, 1999) oder Baden-Württemberg (Luft et al., 1999) wurden ausführliche Regressionsanalysen des Hochwasserverhaltens durchgeführt und dem Anwender stehen fertige Regressionsformeln zur Berechnung von Hochwasserkenngrößen zur Verfügung. Für Österreich ist dies nicht der Fall, da andere, geeignetere Verfahren verfolgt wurden.

Ein wichtiger Schritt bei der Regionalisierung mittels Regressionen ist die Auswahl der Prediktorvariablen, d.h. die Auswahl jener Gebietseigenschaften, die in der Regressionsbeziehung (Gl. 4) verwendet werden. Sinnvoll ist es, jene Kombinationen von Gebietseigenschaften zu wählen, die die größte Korrelation mit der Hochwasserkenngröße haben. Nicht alle sich aus den Daten ergebenden Kombinationen sind aber auch hydrologisch sinnvoll. Die Auswahl der Prediktorvariablen sollte daher auf Plausibilität überprüft werden.

Ein großes Problem bei Mehrfachregressionen ist die Multikollinearität. Multikollinearität beschreibt den Fall, wenn mindestens eine Prediktorvariable der Regressionbeziehung stark mit den anderen Prediktorvariablen oder einer linearen Kombination von Prediktorvariablen korreliert ist. Bei Multikollinearität ist die ermittelte Regressionsbeziehung sehr instabil (d.h. eine kleine Änderung in den Daten würde eine starke Änderung in den berechneten Regressionskoeffizienten hervorrufen) und nicht verlässlich. Eine Methode zur Analyse der Multikollinearität der Prediktorvariablen ist der „Variance Inflation Factor (VIF)“ Ansatz (Hirsch et al., 1992):

$$VIF_j = \frac{1}{1 - r_j^2} \quad (5)$$

wobei r_j^2 der Korrelationskoeffizient der Prediktorvariable j mit allen anderen Prediktorvariablen ist. Besteht keine Kollinearität so ist $VIF_j = 1$. Für $VIF_j > 10$ ist die Regression nicht mehr zuverlässig (Hirsch et al., 1992).

Die Verfahren zur Schätzung der Regressionskoeffizienten basieren auf der Annahme, dass die Daten normalverteilt sind. Viele verfügbaren Daten zeigen jedoch eine schiefe Verteilung. Die Daten sollten daher transformiert werden. In der Hydrologie übliche Transformationen sind die logarithmische Transformation und die exponentielle Transformation $z = x^p$, wobei z die transformierte Variable und x die ursprüngliche Variable ist. Typische Werte für p sind -2 , -1 , -0.5 , -0.33 . Durch die Transformation wird der Einfluss größere Werte gegenüber kleineren Werte verringert.

3.5 Geostatistische Interpolation von Hochwasserkenngrößen

Geostatistische Verfahren beruhen auf der Beobachtung, dass benachbarte Gebiete ein ähnliches Hochwasserverhalten aufzeigen, da sich Klima und Gebietseigenschaften nur allmählich im Raum ändern. Geostatistische Verfahren, wie z.B. Kriging, werden

zur räumliche Interpolation vieler hydrologischer Größen wie Grundwasserstände, Niederschlag oder Bodenfeuchte verwendet (Blöschl, 2006), und wurden auch in Österreich schon erfolgreich zur Bestimmung von regionalen Hochwässern (Merz und Blöschl, 2005) angewendet.

Eine Erweiterung der rein räumlichen Interpolation ist die geostatistische Interpolation mittels Zusatzinformation, wie z.B. Georegression, External drift Kriging oder Cokriging. Entscheidend bei der Interpolation mittels Zusatzinformation ist die geeignete Wahl der Zusatzvariablen. Die Auswahl von Zusatzvariablen kann anhand der Korrelationen mit Hochwasserkenngößen erfolgen. Auch können die Zusatzvariablen anhand von Expertenwissen über das grundsätzliche Verhalten hydrologischer Größen gewählt werden. Ungeeignete Zusatzinformationen können die Interpolation verschlechtern (Blöschl und Grayson, 2000). Für die Hochwasserregionalisierung liegt es Nahe, Informationen über Niederschlag und Bodenfeuchte des Gebietes im Hochwasserfall als Zusatzvariable zu wählen. Als Surrogat für Niederschlag und Bodenfeuchte wird oft der mittlere Jahresniederschlag verwendet.

Traditionelle geostatistische Verfahren beschreiben die Ähnlichkeit über die euklidische Distanz zwischen Punkten. In der Hochwasserregionalisierung ist jedoch die rein euklidische Distanz zwischen Gebieten nicht das beste Maß zur Beschreibung der Ähnlichkeit. Gebiete sind entlang des Gewässernetzes in Teileinzugsgebiete geordnet. Ober- und Unterliegergebiete sind hydrologisch ähnlicher, als Gebiete am benachbarten Gewässer. Eine hydrologisch sinnvolle Erweiterung von Kriging ist Top-Kriging (Skøien et al., 2005), welches die Topologie der Einzugsgebiete berücksichtigt.

Einen großen Einfluss auf die Größe des Hochwassers hat bei der geostatistischen Interpolation die Einzugsgebietsgröße. Um diesen Einfluss der Gebietsgröße bei der Regionalisierung zu beschreiben, können die Hochwasserspenden auf eine einheitliche hypothetische Gebietsfläche normiert werden:

$$q_N = q_A \cdot A^\alpha \cdot A_N^{-\alpha} \quad (6)$$

wobei q_N die auf die hypothetische Gebietsfläche A_N normierte Abflussspende und q_A die Abflussspende der Gebietsfläche A ist. Typische Werte für den Exponenten α sind 0.25 bis 0.45. Der Exponent spiegelt die dominierenden hydrologischen Prozesse in der Region wider. Sind großräumige Prozesse für die Hochwasser ausschlaggebend, sollte ein eher kleiner Wert gewählt werden. Sind aufgrund lokaler Faktoren die Spenden in kleinen Gebieten sehr viel größer als in großen Gebieten, sollte ein größerer Exponent gewählt werden (siehe auch Diskussion der Spendendiagramme).

4. Vergleich und Diskussion von Regionalisierungsmethoden

In Merz und Blöschl (2005) wurde ein systematischer Vergleich von Hochwasserregionalisierungsmethoden für unbeobachtete Einzugsgebiete durchgeführt. Es wurden jeweils mehrere Varianten von Kriging und Kriging mit

Zusatzinformation, Mehrfachregressionen und der ROI Ansatz als Repräsentant der Pooling Methoden verglichen. Ein besonderes Augenmerk wurde auf den Vergleich von Methoden gelegt, die einerseits räumliche Distanz als Maß der Ähnlichkeit zwischen Gebieten verwenden, wie Kriging und Kriging mit Zusatzinformation und andererseits Methoden, die Ähnlichkeit zwischen Gebieten über die Ähnlichkeit in Gebietseigenschaften definieren, wie Mehrfachregression und ROI Ansatz. Die Zuverlässigkeit der Schätzung für unbeobachtete Gebiete wurde mit Hilfe eines Jack-Knife Vergleichs für 575 österreichische Einzugsgebiete untersucht. Beim Jack-Knife Vergleich wurde eines der 575 beobachteten Gebiete als unbeobachtet angenommen und Hochwasserquantile der Jährlichkeit T auf Basis der verbleibenden 574 Gebiete regionalisiert. Der Vergleich der regionalisierten Quantile mit den aus den lokalen Beobachtungsdaten ermittelten Quantile ergibt ein Maß der Regionalisierungsgüte. Dies wurde nun nacheinander für alle 575 Gebiete durchgeführt und statistisch ausgewertet. Als statistisches Maß der Güte wurde der normierte mittlere Fehler und die normierte Standardabweichung der Fehler berechnet und in Abb. 5 gegen das Wiederkehrintervall aufgetragen. Der normierte mittlere Fehler beschreibt den systematischen Fehler, d.h. eine systematische Unter- bzw. Überschätzung, während die normierte Standardabweichung den zufälligen Fehler, d.h. die Streuung um den mittleren Fehler beschreibt. Um den Einfluss der Unsicherheit der lokalen aus den Beobachtungen ermittelten Hochwasserquantile auf die berechneten Fehler zu reduzieren, wurden für die Fehlerstatistik nur Gebiete mit mehr als 40 Beobachtungsjahren verwendet.

Für jeden Typus von Regionalisierungsmethoden wurden mehrere Varianten untersucht. In Abb. 5 sind nur jene gezeigt, die den kleinsten Regionalisierungsfehler aufweisen. Gute Regionalisierungsmethoden sollten betragsmäßig kleine Fehler haben und somit sollte die Kurve nahe der Nulllinie liegen. Deutlich zeigt sich, dass Kriging und Georegression, beides Verfahren, die Ähnlichkeit zwischen Gebieten über die räumliche Distanz definieren, kleinere Fehler aufweisen als die Mehrfachregression und der ROI Ansatz. So sind z.B. für ein 100 jährliches Hochwasser die zufälligen Fehler 0.3 bzw. 0.33, während für die Mehrfachregression und der ROI Ansatz der zufällige Fehler 0.42 bzw. 0.46 beträgt. Der ROI Ansatz hat etwas geringere Fehler. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß in dieser Version des ROI auch räumlich Distanz neben Gebietseigenschaften als Maß der Ähnlichkeit zugelassen wurde. Georegression ist der beste Ansatz, d.h. Kriging kann durch Zusatzinformation verbessert werden.

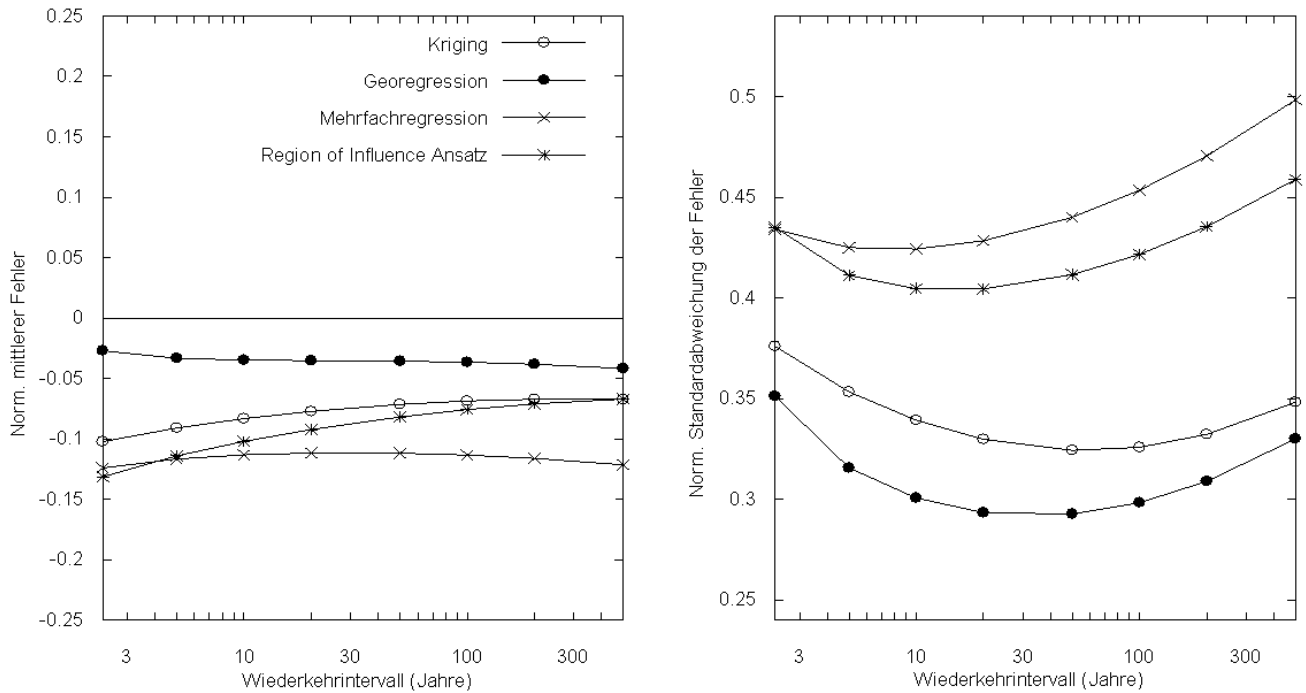


Abb. 5: Vergleich der Güte von Regionalisierungsverfahren in Österreich. Links: normierter mittlerer Fehler, Rechts: normierte Standardabweichung der Fehler. Daten von 575 österreichischen Gebieten (Merz and Blöschl, 2005).

Abb. 6 zeigt die räumliche Verteilung der relativen Fehler. Der relative Fehler, berechnet als Differenz zwischen regionalisierter und lokal geschätzter Abflusspende, wurde durch die lokal geschätzte Abflusspende normiert. Die Fehlermuster sind räumlich sehr unausgewogen und zeigen sehr viel kleinräumige Variabilität. Dies zeigt, dass keine der Methoden die kleinräumige Unterschiede in den Hochwasserprozessen zwischen den Gebieten genau erfassen kann. Kriging und Georegression zeigen, bis auf wenige Gebiete mit einer starken Überschätzung, kleinere bis mittlere Fehler. Mehrfachregression und ROI Ansatz überschätzen die Hochwasserabflüsse besonders in Regionen mit kleinen Abflusspenden.

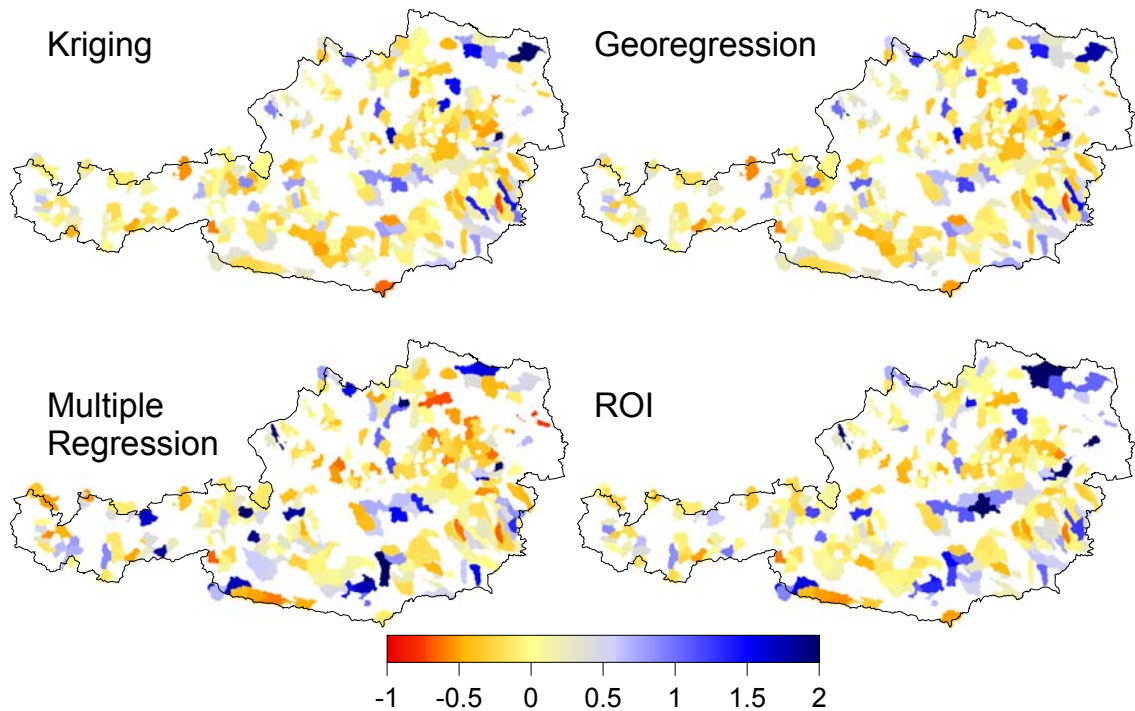


Abb. 6: Räumliche Verteilung der normierten Differenz zwischen regionalisierter und lokal geschätzter 100 jährlicher Abflusspende (Merz and Blöschl, 2005).

Interessant ist dieses Ergebnis im Vergleich zu England zu sehen. Im Flood Estimation Handbook (IH, 1999) werden Mehrfachregression bzw. der ROI Ansatz als Regionalisierungsmethode empfohlen. Aufgrund der Topographie und der großen klimatischen Differenzierung in Österreich im Vergleich zum doch eher räumlich gleichmässigeren Klima in England wäre ein gegenteiliges Ergebnis zu erwarten. Hauptgrund der recht schlechten Ergebnisse von Mehrfachregression und ROI Ansatz in Österreich dürften die verwendeten Gebietseigenschaften, wie z.B. Geologie, Landnutzung, Bodentyp sein. Diese Gebietseigenschaften sind für hydrologische Unterscheidungen nur sehr bedingt brauchbar. In England hingegen ist eine hydrologisch ausgerichtete Klassifizierung der Böden vorhanden (Hydrology of Soil Types) (Boorman et al., 1995), die für die Regionalisierung von Hochwässern angewendet wird. Wären ähnlich hydrologisch ausgerichtete Gebietseigenschaften flächendeckend für Österreich vorhanden, wäre mit einer Verbesserung der Regionalisierungsgüte von Mehrfachregressionen und ROI Ansatz zu rechnen.

Die Variabilität hydrologischer Prozesse, die zu Hochwässern führen, kann sehr groß sein. Kein hydrologisches Verfahren zur Bestimmung von Hochwasserkennwerten kann alle Aspekte der Hochwasserentstehung berücksichtigen. Um statistische Hochwasserkenngrößen mit vertretbarer Genauigkeit zu bestimmen, ist es daher sinnvoll, mehrere Methoden, die auf verschiedene Aspekte der Hochwasserentstehung eingehen, zu kombinieren. Die zu kombinierenden Methoden sollten sich in Hinblick auf die verwendeten Daten und Information und in Hinblick auf die Voraussetzungen, Annahmen und Einflussfaktoren unterscheiden. Die Idee dieses Kombinationsansatz entspricht dem von Gutknecht et al. (2006) vorgeschlagenen „Mehr-Standbeine“-

Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeiten. In diesem Ansatz werden zur Berechnung von Hochwässern großer Jährlichkeiten, wie z.B. bei der Bemessung von Talsperren erforderlich, lokale Hochwasserstatistik, regionale Hochwasserstatistik, NA-Modellierung, Gradex-Verfahren und Hüllkurven kombiniert.

Viele Aspekte in der regionalen Betrachtung von Hochwasserkenngößen sind nicht leicht formalisierbar, z.B. Zuverlässigkeit von Pegeln, Ausuferung, mögliche Umströmung, zeitliche Heterogenität in den Reihen, räumliche lokale Effekte oder anthropogene Effekte. Diese Aspekte können durch eine manuelle Einschätzung durch Sachbearbeiter berücksichtigt werden. Sinnvoll erscheint es daher, mit Hilfe der oben beschriebenen automatischen Regionalisierungsverfahren Vorschlagswerte zu berechnen, die durch den Sachbearbeiter aufgrund seiner hydrologische Einschätzung bestätigt oder geändert werden können.

Die Vorgehensweise eines Kombinationsansatzes wurde im Projekt Hochwasser Risiko Zonierung Austria (HORA) (Blöschl et al., 2006) gewählt. Ziel des Projektes HORA war die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten für Hochwasserabflüsse (HQ_T) der Jährlichkeiten $T=30$, $T=100$ und $T=200$ bezogen auf das im Maßstab 1:500 000 erfasste österreichische Flussnetz (ÖK 500) mit einer Gesamtlänge von ca. 26 000 km. Dies entspricht einer Bestimmung von Hochwasserabflüssen für mehr als 10000 Gebiete. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und dem Versicherungsverband Österreich nach dem Katastrophenhochwasser 2002 ins Leben gerufen. Die hydrologischen Arbeiten zur Bestimmung der T-jährlichen Abflüsse wurden vom Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Günter Humer in Geboltskirchen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden für jeden Pegel die Hochwasserabflüsse bestimmt. Dies erfolgte anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise. Die aus den Beobachtungsdaten bestimmten Schätzungen der Hochwasserabflüsse wurden mit Hilfe der zeitlichen, räumlichen und kausalen Zusatzinformationen verbessert. Die Pegelwerte wurden einzeln mit den hydrologischen Landesdiensten diskutiert und gegebenenfalls mit an den Diensten vorhandenen Studien verglichen. Zur Bestimmung von Hochwasserabflüssen zwischen den Pegeln wurden die Hochwasserkennwerte der Pegel mit einer Kombination von Topkriging und einer Regression der Mittelwerte der Hochwasserverteilung mit dem Jahresniederschlag regionalisiert. Der Einfluss von Speichern und Seen wurde berücksichtigt. Um die lokalen Besonderheiten in der Regionalisierung besser berücksichtigen zu können, wurden manuell neue Stützstellen gesetzt, für die aufgrund der Einschätzung des Bearbeiters, ähnlich zu den Pegelstellen, die Hochwasserkennwerte festgelegt wurden. Die Regionalisierungsergebnisse wurden manuell überprüft und teilweise mit den Sachbearbeitern der hydrographischen Landesdiensten diskutiert. Durch die enge Einbindung der hydrographischen Landesdienste konnte eine hohe Akzeptanz erreicht werden.

Da es bei HORA um eine Einschätzung des Hochwasserrisikos geht, wurden die zu bestimmenden Hochwasserabflüsse als Schätzungen für den wahrscheinlichsten Wert einer bestimmten Jährlichkeit definiert. Im Gegensatz dazu decken üblicherweise Bemessungswerte des Durchflusses Unsicherheiten ab und werden in der Praxis manchmal – je nach dem Ausmaß der Unsicherheit – größer als der wahrscheinlichste Wert gewählt. Deshalb können sich die HORA Werte von Bemessungswerten des Abflusses unterscheiden.

Als Beispiel der HORA Ergebnisse zeigt Abb. 7 die hundertjährige Hochwasserspende in Österreich. Es zeigen sich große regionale Unterschiede mit hohen Hochwasserspenden in den niederschlagsreichen Gebieten am Alpennordrand und kleineren Spenden in den niederschlagsärmeren Gebieten im Osten Österreichs. Im Vergleich zu früheren regionalen Auswertungen der Hochwasserspenden zeigen die HORA Ergebnisse ein räumlich weit differenzierteres Bild. Durch den gewählten Kombinationsansatz, die Einbeziehung der umfangreichen Zusatzinformationen über das Hochwasserverhalten und die manuelle Nachbearbeitung der Gebiete konnten sehr viele regionale Besonderheiten erfasst und die Unsicherheit in der Hochwasserabschätzung reduziert werden.

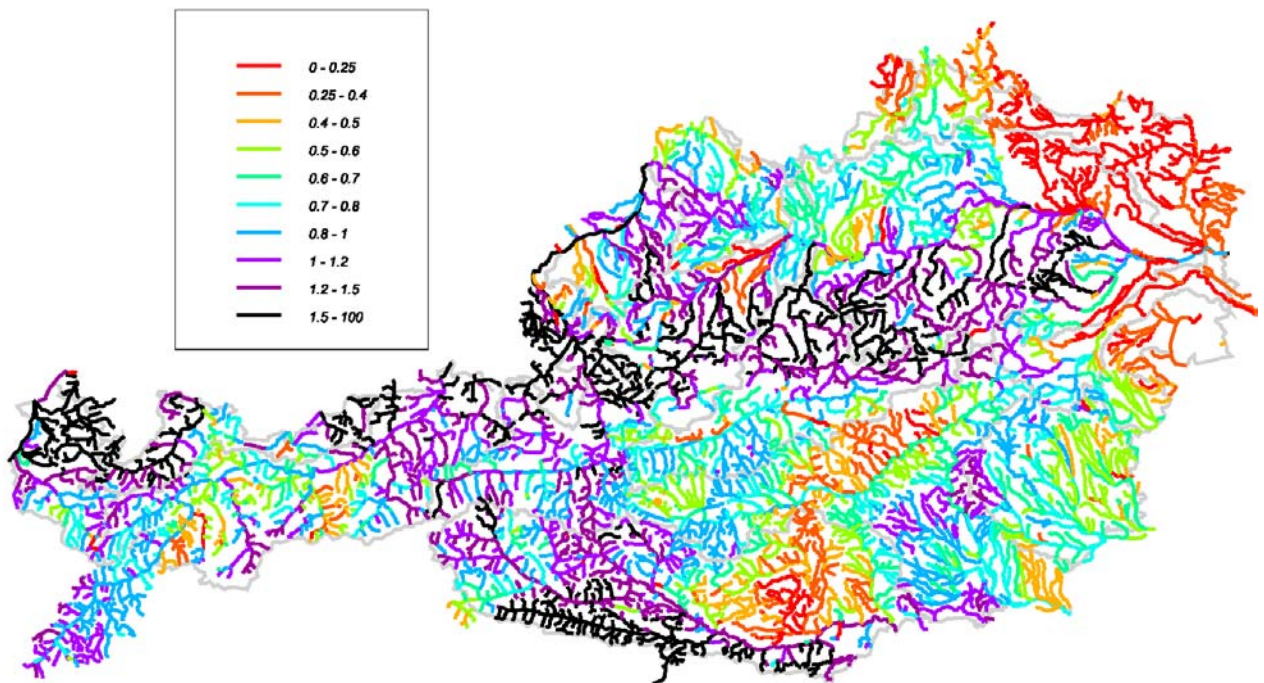


Abb. 7: 100-jährliche Abflussspende ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), normiert auf 100km^2

5. Danksagung

Für finanzielle Unterstützung im Rahmen eines APART [AUSTRIAN PROGRAMME FOR ADVANCED RESEARCH AND TECHNOLOGY] Stipendium wird der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gedankt.

6. Literatur

Blöschl, G. (2006) Geostatistische Methoden bei der hydrologischen Regionalisierung. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 21-40.

Blöschl, G. and R. Grayson (2000) Spatial observations and interpolation. Chapter 2 in R. Grayson and G. Blöschl (Eds.) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 17-50.

Blöschl, G., Merz, R., Humer, G., Hofer, M., Hochold, A., Wührer, W. (2006) HORA - Hydrologische Arbeiten, Endbericht an das BMLFUW, Sektion VII, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien.

Boorman D.B., Hollis J.M. and Lilly A. (1995) Hydrology of Soil Types: A Hydrologically Based Classification of the Soils of the United Kingdom, IH Report No. 126, Institute of Hydrology, Wallingford.

Burn, D.H. (1990) Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26(10), 2257-2265.

Dalrymple, T. (1960) Flood frequency methods, U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 1543-A, 11-51.

Düster, H. (1994) Die Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Diss. Univ. Bern, 203 pp.

Flood Studies Report (1975) Vol. I - Hydrological Studies. Natural Environment Research Council, 27 Charing Cross Rd., London, 570 pp.

Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch. und Heindl, H. (2006) Eine „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58(3-4), S. 44-50.

Hagen, K. (2005) Bemessungshilfen für Hochwasserabflüsse in Wildbächen. BFW-Praxisinformation 8, 18 – 20.

Hosking, J.R.M. (2000) Fortran routines for use with the method of L-moments, Research Report, RC 20525 (90933) 8/5/96, revised 6/20/00, IBM research Divison, T.J. Watson Research Division, Yorktown heights, NY, 33 (<http://www.research.ibm.com/people/h/hosking/lmoments.html#LMOMENTS>).

Hosking, J.R.M. and Wallis J. R. (1997) Regional Frequency Analysis– An Approach based on L-Moments.. Cambridge University Press, Cambridge, 224 pp.

Institute of Hydrology (IH) (1999) Flood Estimation Handbook. Institute of Hydrology, Wallingford.

Lettenmaier, D.P., Wallis, J.R. and Wood, E.F. (1987) Effect of heterogeneity on flood frequency estimation, *Water Resources Research* 23, 313-323.

- Luft, G., Ihringer, J., Becker, R., Brunner, R., Harlos, S., Kiefer, H., Merz, R., Neff, H.-P., Marusic, D., Hönig, U. und Casper, M. (1999) Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg, Handbuch Wasser, Oberirdische Gewässer/Gewässerökologie, Band 54, Landesanstalt f. Umweltschutz Baden-Württemberg, LfU Karlsruhe.
- Merz R. and Blöschl, G. (2003) A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, VOL. 39, NO. 12, 1340, doi:10.1029/2002WR001952
- Merz, R. and Blöschl, G. (2005) Flood Frequency Regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes, *Journal of Hydrology*, 302 (1-4), 283-306.
- Merz, R. (2006) Regionalisierung von Ereigniskenngrößen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 179-194.
- Merz, R., Blöschl, G, and Piock-Ellena, U. (1999) Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51, Heft 11/12, pp. 291-305.
- Merz, R., Blöschl, G., Parajka, D. (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (1), S.2-11.
- Piock-Ellena, U., Merz, R., Blöschl, G. and Gutknecht, D. (1999) On the regionalisation of flood frequencies - Catchment similarity based on seasonality measures. XXVIII IAHR Proceedings, CD-Rom: 434.htm.
- Skøien, J., Merz, R. and Blöschl, G. (2006) Top-kriging - geostatistics on stream networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 277–287.
- Weilguni, V. (2006) Regionalisierung des Niederschlags. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 71-92.
- Wiltshire, S. E. (1986a) Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 84, 287-302.
- Wiltshire, S. E. (1986b) Regional flood frequency analysis I: Homogeneity statistics, *Hydrological Science Journal*, 31, 321-333
- Wundt, W. (1949) Die größten Abflußpenden in Abhängigkeit von der Fläche. *Die Wasserwirtschaft*, 40, 59-64.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Ralf Merz
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222
A-1040 Wien
Tel: +43 1 58801 22312
Fax: +43 1 58801 22399
Email: merz@hydro.tuwien.ac.at