Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 92 (2000)

Heft: 1-2

Artikel: Saisonalitätsanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern

Autor: Piock-Ellena, Ulrike / Blöschl, Günter / Burlando. Paolo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940231

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Saisonalitätsanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern

■ *Ulrike Piock-Ellena, Martin Pfaundler, Günter Blöschl, Paolo Burlando und Ralf Merz*

Die räumliche Abgrenzung von Regionen, die in Hinblick auf das Verhalten extremer Ereignisse als homogen angesehen werden können, ist für die Regionalisierung von Hochwässern von zentraler Bedeutung. In dieser Arbeit wird die These aufgestellt, dass die Saisonalität von hydrologischen Grössen auf die hochwasserauslösenden Prozesse und damit auf das Hochwasserverhalten schliessen lässt, wodurch sich homogene Regionen bestimmen lassen. Die Saisonalität der Jahreshochwässer, der mittleren monatlichen Abflüsse, der Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge und der Monatssummen des Niederschlags in Österreich und der Schweiz wird analysiert. Es zeigt sich, dass eine synoptische Zusammenschau eine gute Beurteilung der regionalen Verteilung der hochwasserrelevanten Prozesse erlaubt. Mit Hilfe einer Clusteranalyse werden homogene Regionen in Österreich und der Schweiz bestimmt, die hydrologisch gut interpretierbar sind. Statistische Homogenitätstests deuten allerdings darauf hin, dass die Hochwasserkollektive in den einzelnen Regionen nicht als homogen angesehen werden können. Verfeinerte Ergebnisse sind durch eine Kombination einer manuellen Analyse mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren zu erwarten.

1. Einleitung

Die Abschätzung von Hochwasserabflüssen einer bestimmten Jährlichkeit für Gebiete ohne Abflussmessungen erfolgt häufig unter Verwendung regionaler Information aus benachbarten Gebieten. Auch für Gebiete, für die Abflussreihen vorhanden sind, kann regionale Information die Abschätzung von Hochwasserabflüssen verbessern, insbesondere wenn grosse Jährlichkeiten erforderlich sind. Für die regionale Übertragung bzw. Regionalisierung stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung. Zu den einfachsten Verfahren zählen Hüllkurven (Wundt, 1950; Melli, 1924; Kürsteiner, 1917), die allerdings keine Bestimmung der einem Hochwasserwert zugeordneten Jährlichkeit erlauben. Weitere Verfahren unterscheidet man dahingehend, wie die räumlichen Bezüge hergestellt werden. Beispielsweise werden in den letzten Jahren vermehrt Regressionen der Hochwasserwerte mit diversen Einzugsgebietseigenschaften untersucht (z. B. Düster, 1994). Allerdings ist die Korrelation zwischen Hochwasserabflüssen und Gebietseigenschaften meist gering (z. B. Blöschl et al., 1999; Kohnova and Szolgay, 1999). Auch aus methodischen Gründen kann dieser Ansatz sehr ungenau sein (Cunnane, 1988). Eine Alternative sind Methoden, denen die Annahme zugrunde liegt, dass sich «homogene» Regionen definieren lassen. Dabei werden die Daten der Einzugsgebiete innerhalb einer homogenen Region zusammengefasst (d. h. gepoolt), wodurch sich die Aussagekraft von kurzen Reihen erheblich steigern lässt. Die bekannteste Methode dieser Art ist die «Index flood method» (Dalrymple, 1960; Flood Studies Report, 1975). Dabei werden in einem ersten Schritt 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. 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 Einzugsgebietscharakteristika ermittelt.

Allerdings stösst bei diesem und ähnlichen Ansätzen die Frage nach der Existenz und der räumlichen Abgrenzung der homogenen Regionen auf erhebliche Schwierigkeiten. Die räumliche Abgrenzung der homogenen Regionen kann auf Basis zweier grundsätzlich unterschiedlicher Informationen erfolgen. Einerseits werden die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven selbst manchmal dafür verwendet. Allerdings stellt dies zumindest für beobachtete Gebiete das «pooling» in Frage, denn eine Verbesserung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven auf Basis der gleichen Information ist wie das sprichwörtliche Vorgehen Münchhausens, der sich am eigenen Schopf aus dem Sumpf zog. Insbesondere kann bei verhältnismässig kurzen Reihenlängen das Abweichen der Stichprobe von der Grundgesamtheit zur Bestimmung fehlerhafter Regionen führen. Andererseits werden oft Einzugsgebietscharakteristika für die räumliche Abgrenzung der homogenen Regionen herangezogen. Dies kann auf Basis einer subjektiven Einschätzung erfolgen (wie etwa bei der Index-flood-Methode) oder auf der Basis von statistischen 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, sowie der «Region Of Influence» (ROI)-Ansatz (Burn, 1990), bei dem keine a-priori-Festlegung einer begrenzten Anzahl an Regionen erfolgt, sondern jedes untersuchte Einzugsgebiet seine eigene Region erhält. Die Verwendung von Einzugsgebietscharakteristika wird allerdings durch die meist geringen Korrelationen zwischen Hochwasserabflüssen und Gebietseigenschaften ebenfalls in Frage gestellt. Geeignete Methoden zur räumlichen Abgrenzung homogener Regionen sind deshalb ein wichtiger bisher noch offener Punkt bei der Regionalisierung von Hochwässern.

In dieser Arbeit wird ein alternativer Ansatz zur räumlichen Abgrenzung homogener Regionen verwendet, der den oben angeführten Problemen Rechnung trägt. Dieser Ansatz folgt Piock et al. (1999a, b) und basiert auf der Analyse der Saisonalität unterschiedlicher hydrologischer Grössen. Der Grundgedanke ist dabei, dass angenommen wird, dass die Saisonalität, d. h. der Zeitpunkt des Auftretens innerhalb eines Jahres und das Ausmass der Schwankungen innerhalb eines Jahres, von hydrologischen Grössen einen guten Rückschluss auf die Prozesse zulässt, die mit dem Hochwasserverhalten in Verbindung stehen. Gleiches bzw. ähnliches Verhalten in Hinblick auf die Saisonalität lässt dann auf gleiche bzw. ähnliche hochwasserauslösende Prozesse schliessen, und dies wiederum lässt auf ein ähnliches Verhalten der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven im Bereich extremer Hochwässer schliessen. Ein wichtiger Aspekt dieses Ansatzes ist, dass nicht nur der Zeitpunkt des Auftretens der Hochwässer verwendet wird, sondern auch das zeitliche Auftreten von Extremniederschlägen sowie der jahreszeitliche Verlauf des mittleren Abflusses (d. h. das Regime,

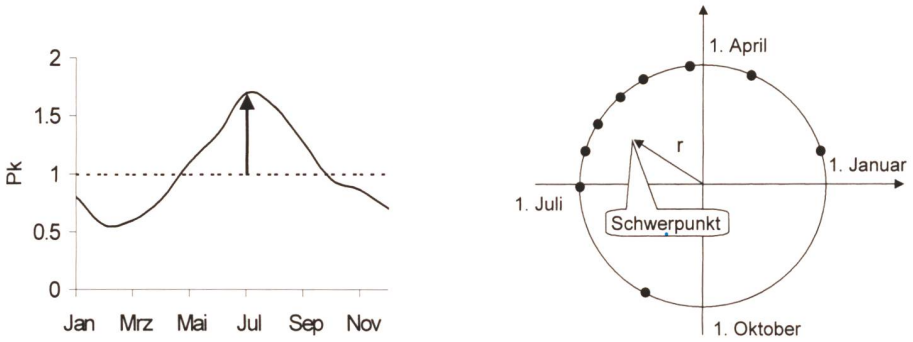

Bild 1. Saisonalitätsparameter nach (a) Pardé (1920) und (b) Burn (1997).

siehe z. B. Kresser, 1965; Aschwanden et al., 1986) sowie der jahreszeitliche Verlauf des mittleren Niederschlages. Die Saisonalität dieser Grössen wird quasi als Fingerabdruck der gesamten hydrologischen Situation angesehen, für die zu vermuten ist, dass sie auch für die Hochwassermechanismen wichtig ist (Merz et al., 1999). Dieser Ansatz ist besonders für Länder interessant, die naturräumlich derart heterogen sind wie Österreich und die Schweiz, in denen die Landschaftsräume jeweils vom Flachland bis zu den alpinen Gebieten reichen. In dieser Arbeit werden Österreich und die Schweiz gemeinsam analysiert. Dies erlaubt wegen der Ähnlichkeit der Landschaftsräume in den beiden Ländern einen guten Vergleich und ergibt wichtige allgemeine Hinweise für die Regionalisierung von Hochwässern.

2. Datenbasis und Saisonalitätsparameter

Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze beziehen sich auf das gesamte Gebiet von Österreich und der Schweiz und setzen sich aus Abflussdaten und Niederschlagsdaten zusammen. Die Abflussdaten bestehen aus den Reihen der Jahreshochwässer und den mittleren monatlichen Abflüssen an insgesamt 793 Pegeln. Es wurden Einzugsgebiete mit einer Einzugsgebietsgrösse zwischen 10 und 10000 km^2 und einer Mindestreihenlänge von 15 Jahren betrachtet. Gebiete mit starken anthropogenen Beeinflussungen durch Speicher oder Zu-, Ab- und Überleitungen wurden aus den Betrachtungen ausgeschlossen entsprechend der Vorgangsweise in Piock und Blöschl (1998) und Rosso (1999). Die Niederschlagsdaten bestehen aus Reihen der Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge und der Monatssummen des Niederschlags. Dabei wurde für jeden Pegel die nächstgelegene Niederschlagsstation ausgewählt und dem gleichen Einzugsgebiet zugeordnet. Demnach ergeben sich für den Niederschlag ebenfalls 793 Stationen.

Für die Analyse der Saisonalität war es vorerst notwendig, quantitative Kenngrössen der Saisonalität zu bestimmen. Die Saisonalität der mittleren Monatsabflüsse wurde mittels des Pardé-Koeffizienten (Pardé, 1920) quantifiziert (Bild 1a). Für einen Monat i zwischen 1 und 12 ist

$$Pk_i = \frac{12}{n} \sum_{j=1}^{n} \left(Q_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{12} Q_{ij} \right) \qquad (1)$$

wobei Qij der mittlere monatliche Abfluss im Monat i und Jahr j und n die Anzahl der Jahre der Abflussreihe sind. Der maximale Pardé-Koeffizient $Pk = \max (Pk_i)$ der 12 Monate wurde ermittelt sowie der Monat i_{max}, in dem Pk aufgetreten ist. Liegt Pk bei 1, so ist der Abfluss während eines Jahres ausgeglichen, liegt Pk hingegen bei 12, so tritt der gesamte Abfluss innerhalb des Monats i_{max} auf. Diese Saisonalitätsmasse wurden graphisch als Vektor dargestellt, wobei die Länge des Vektors proportional zu Pk ist und die Richtung durch den Monat i_{max} bestimmt wird, in dem das Maximum aufgetreten ist. Die Saisonalität des mittleren monatlichen Niederschlages wurde analog bestimmt.

Die Saisonalität der Jahreshochwässer wurde mittels des Ansatzes von Burn (1997) quantifiziert (Bild 1b). Nach diesem Ansatz wird D als das Julianische Datum des Auftretens des Hochwasserscheitels definiert, wobei $D = 1$ für den 1. Januar und $D = 365$ für den 31. Dezember steht. D kann nun in Polarkoordinaten auf dem Einheitskreis mit Winkel $\Theta = D \cdot 2\pi/365$ dargestellt werden. Die Richtung des mittleren Vektors für alle Ereignisse eines Einzugsgebietes ergibt das mittlere Auftretensdatum und die Länge r des mittleren Vektors ist ein Mass für die Variabilität des Auftretensdatums. Werte für r liegen zwischen 0 (die Hochwässer treten gleichmässig während des ganzen Jahres auf) und 1 (alle Hochwässer treten zu einem einzigen Datum auf). Die Saisonalität der maximalen jährlichen Tagesniederschläge wurde analog bestimmt.

3. Analyse der Saisonalität

Das Bild 2 soll als Orientierungshilfe für die verschiedenen geographischen Regionen in der Schweiz und in Österreich dienen. Die Bilder 3 bis 6 zeigen die Saisonalitätsvektoren für die mittleren Monatsabflüsse, die Jahreshochwässer, die mittleren monatlichen Niederschläge und die maximalen jährlichen Tagesniederschläge für Österreich und die Schweiz. Richtung und Länge der Vektoren entsprechen den Saisonalitätsmassen, und die räumliche Lage entspricht den Pegelkoordinaten. Dabei lassen sich die folgenden Prozessinterpretationen anstellen. In den zentralalpinen Gebieten der Schweiz und Westösterreichs treten die Hochwässer meist im Sommer, und zwar mit ausgeprägter Saisonalität, auf. In diesen Gebieten treten die maximalen Monatsabflüsse ebenfalls im Sommer auf, während die maximalen jährlichen Tagesniederschläge bis auf einen Bereich in Graubünden kaum bzw. unterschiedliche Saisonalität zeigen. Das deutet darauf hin, dass hier die Gletscher- und Schneeschmelzabflüsse wichtig für das Auftreten von Hochwässern sind. In den Einzugsgebieten im Norden Österreichs und im Norden der Schweiz, die zumeist geringe Seehöhen aufweisen, schwankt der Auftretenszeitpunkt der Hochwässer zum Teil erheblich. In beiden Ländern zeigt sich ein unruhiges Bild, wobei die Hochwässer eher im Frühjahr auftreten.

Bild 2. Geographische Regionen in der Schweiz und in Österreich.

Dies deutet auf eine stärkere Reaktion auf Frontniederschläge in dieser Zeit hin. Die stärkere Saisonalität der Tageshöchstwerte der Starkniederschläge in den Sommermonaten scheint sich daher in diesen Gebieten nicht so gravierend auf das Hochwassergeschehen auszuwirken.

Das Juragebiet im Westen der Schweiz zeigt eine deutliche Saisonalität der Hochwässer im Winterhalbjahr und eine geringer ausgeprägte Saisonalität der mittleren Abflüsse mit dem Maximum im April. Da die Monatsniederschläge und die Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge nur geringe Saisonalitäten zeigen, wird als Erklärung für die Saisonalität der Hochwässer folgendes vermutet:

Die Böden weisen ein sehr ausgeprägtes Niederschlagsrückhaltevermögen auf, und auch die Verkarstung dieses Gebietes führt zu einer Erhöhung der Infiltration. Durch den saisonalen Zyklus der Bodenfeuchte, mit höherer Bodenfeuchte im Winter/Frühjahr, dürfte zu diesen Jahreszeiten die Abflussbereitschaft grösser sein und somit häufiger Jahreshochwässer auftreten.

In Südostösterreich (steirisches Hügelland) treten sowohl die Hochwässer als auch die jährlichen maximalen Tagesniederschläge im Spätsommer auf. Die mittleren Monatsabflüsse zeigen kaum Saisonalität, und der mittlere Monatsniederschlag zeigt ein schwaches Maximum im Frühsommer. Das deutet darauf hin, dass Sommergewitter hier ein wichtiger hochwasserauslösender Prozess sind.

Eine spezielle Situation zeigt sich im südlichen Kärnten im Gailtal. Während die Saisonalität der mittleren Monatsabflüsse ähnlich denen in anderen Gebieten mit der gleichen Seehöhe ist, ist die Saisonalität des mittleren Monatsniederschlages, des maximalen jährlichen Tagesniederschlages und der Hochwässer sehr unterschiedlich. Dies deutet darauf hin, dass sich diese Region klimatologisch und hydrologisch deutlich von anderen Gebieten in Österreich abhebt. Hier sind die für diese Gegend spezifischen Wetterlagen mit mediterranem Einfluss eine häufige Ursache für grosse Hochwässer.

Ebenfalls stark mediterraner Einfluss lässt sich im Tessin im Süden der Schweiz beobachten, wo starke Saisonalitäten von Hochwässern und Starkniederschlägen im Hochsommer bis Frühherbst auf Sommergewitter (induzierte konvektive Ereignisse, ausgelöst durch orographische Hebung von südlichen Luftmassenanströmungen) als hochwasserauslösenden Prozess hindeuten. Die relativ starke Saisonalität der mittleren monatlichen Abflüsse in den frühen Sommermonaten lässt sich aufgrund der Südausrichtung

Bild 3. Saisonalität der mittleren monatlichen Abflüsse (Abflussregime) in der Schweiz und in Österreich.

Bild 4. Saisonalität der Jahreshochwässer in der Schweiz und in Österreich.

Bild 5. Saisonalität der mittleren monatlichen Niederschläge in der Schweiz und in Österreich.

Bild 6. Saisonalität der Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge in der Schweiz und in Österreich.

des Tessins mit einer damit verbundenen früheren Schneeschmelze erklären.

Insgesamt fällt auf, dass die Saisonalitätsbilder in der Schweiz unregelmässiger sind als in Österreich. Dies trifft in besonderem Masse für die Saisonalität des mittleren monatlichen Niederschlages zu. Eine mögliche Ursache dafür könnte das Zusammentreffen des Atlantikeinflusses und des mediterranen Einflusses sein, das sich in der Schweiz hydrologisch stärker bemerkbar macht. Eine weitere mögliche Ursache könnte die unterschiedliche topographische Ausrichtung des Alpenbogens in der Schweiz und in Österreich sein.

4. Auffinden homogener Regionen mittels Clusteranalyse

Die vorhergehenden Prozessinterpretationen können in unterschiedlicher Weise zur Regionalisierung von Hochwässern herangezogen werden. In dieser Arbeit werden dem Vorschlag von Piock et al. (1999a) folgend nur die Saisonalitätsmasse zur Bestimmung homogener Regionen herangezogen. Ähnliches Verhalten der Saisonalität innerhalb einer Region lässt dann auf ein ähnliches Verhalten der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven im Bereich extremer Hochwässer schliessen. Die Gruppierung erfolgte automatisch mittels Clusteranalyse, wobei die Euklidische Distanz als Distanzmass verwendet wurde (Kaufman and Rousseeuw, 1990). Jeder Cluster entspricht einer homogenen Region, die aus mehreren Einzugsgebieten besteht. Die Anzahl der Cluster wurde für Österreich mit 8 und für die Schweiz mit 10 vorgegeben. Als Variablen wurden die Saisonalität der Jahreshochwässer (r und Θ) sowie die Saisonalität der mittleren Monatsabflüsse (Pk und i_{max}) verwendet. Die räumlichen Koordinaten der Pegel wurden auch als Variablen einbezogen, um räumlich zusammenhängende Regionen zu erhalten. Da die Variablen unterschiedliche Dimensionen besitzen, wurden sie normiert und mit Gewichten versehen (Tabelle 1). Diese Gewichte erlauben es, den Einfluss einzelner Variablen auf die Clusterbildung festzulegen. Die in Tabelle 1 angeführten Gewichte wurden aus Testrechnungen bestimmt.

Das Ergebnis der Clusteranalyse ist in Bild 7 dargestellt, wobei jeder Cluster durch ein eigenes Symbol gekennzeichnet ist. In Tabelle 2 sind die mittleren Saisonalitätsparameter der einzelnen homogenen Regionen (Cluster) aufgelistet. Mit der Zielsetzung, Cluster in beiden Ländern zu finden, die sich durch sehr ähnliche Saisonalitätsmasse in den Clusterzentren auszeichnen, ergaben sich zwei grenzübergreifende Regionen. Die

	Variablen	Gewichte
Koordinaten	x	0,75
	y	0,75
Saisonalität der Hochwässer	r	0,24
	$\sin(\bar{\Theta})$	0,55
	$\cos(\bar{\Theta})$	0,55
Saisonalität der mittleren monatlichen Abflüsse (Regime)	Pk	1
	$\sin(i_{max})$	0,51
	$\cos(i_{max})$	0,40

Tabelle 1. Variablen und Gewichte für die Clusteranalyse.

Cluster-region	Lage	r-Wert	Auftretensdatum Hochwasser	Max. Pardé-Koeffizient	Auftretensdatum maximaler mittlerer monatlicher Abfluss	Mittleres Jahreshochwasser [m³/(s* km²)]	cv [1]	cs [1]
CH1	niedere Gebiete der Zentralalpen	0,73	August	2,1	Juni	0,41	0,38	0,74
CH2	Jura	0,48	Januar/Februar	1,60	März/April	0,31	0,33	0,59
CH3	nördliches Mittelland	0,32	März	1,45	März	0,35	0,46	1,10
CH4	Graubünden	0,76	Juli	2,58	Juni	0,28	0,41	1,08
CH5	nördliches Alpenvorland	0,44	April/Mai	1,41	April	0,26	0,46	1,10
CH6	westliches Alpenvorland	0,44	August	1,72	April/Mai	0,31	0,38	1,02
CH7	Nordschweiz	0,35	Mai	1,40	März	0,30	0,49	1,24
CH8	Wallis	0,86	Juli/August	2,77	Juli	0,36	0,36	1,26
CH9	Tessin, ohne Nordtessin	0,65	August	1,78	Mai	0,26	0,50	0,99
CH10	Zone südwestlich von Graubünden	0,80	August	2,80	Juli	0,41	0,43	1,06
A1	Alpenvorland und Teile Burgenlands	0,34	Juli/August	1,42	April	0,26	0,57	1,15
A2	Alpenvorland	0,26	März/April	1,36	April	0,23	0,49	1,15
A3	Steiermark	0,57	Juni	2,05	Mai	0,25	0,41	1,25
A4	Nordrand der Alpen	0,54	Juli	1,73	Mai	0,44	0,42	1,08
A5	niedere Gebiete Tirols, Pinzgau, westl. Kärnten	0,74	Juli	2,26	Juni	0,28	0,44	1,28
A6	Kärnten und südliche Steiermark	0,44	September	1,42	April/Mai	0,17	0,53	1,06
A7	hochgelegene Gebiete Tirols	0,83	Juli	2,85	Juni	0,49	0,41	1,50
A8	Mühlviertel, Waldviertel	0,39	März/April	1,72	März/April	0,20	0,58	1,17

Tabelle 2. Mittelwerte der Saisonalitätsparameter, der mittleren Jahreshochwasserspende, des Variationskoeffizienten cv und der Schiefe cs der Jahreshochwässer für die verschiedenen Clusterregionen.

Cluster-region	Anzahl der Stationen	Stationsjahre	mittlere Messreihen-länge	Dalrymple-Test	Wiltshire-Test		
					Einstufung	R-Test	R-kritisch
CH1	23	913	40			39,6	33,9
CH2	22	719	33			16,5	32,7
CH3	23	620	27			133	34,5
CH4	22	836	38			27,9	33,7
CH5	61	1427	23			743	79,8
CH6	20	853	43			64	33,6
CH7	37	789	21			268	51,5
CH8	23	1007	44			117	34,5
CH9	18	527	29			27,6	27,6
CH10	21	794	38			44,4	31,0
A1	74	2094	28			1039	94,8
A2	50	1170	23			385	66,3
A3	51	1451	28			214	67,5
A4	54	1806	33			215	71,1
A5	73	2524	35			644	93,7
A6	52	1606	31			411	68,7
A7	48	1551	32			195	64,6
A8	68	1730	25			799	87,9

akzeptierbar homogen	möglicherweise heterogen	definitiv heterogen

Tabelle 3. Ergebnisse der statistischen Homogenitätstests.

erste Region besteht aus Cluster A7 und Cluster CH10 (blaue Punkte in Bild 7), die durch Gletscherschmelze beeinflussten Gebieten in Tirol bzw. südwestlich von Graubünden entsprechen. In dieser Region ist die Saisonalität sehr hoch (r = 0,81 im Juli/August, Pk = 2,82 im Juni/Juli). Die zweite grenzübergreifende Region besteht aus Cluster A5 und Cluster CH1 (rote Punkte in Bild 7), die durch Schneeschmelze beeinflussten Gebieten in den etwas niederer gelegenen alpinen Gebieten in Westösterreich bzw. nordwestlich Graubünden entsprechen. Hier ist die Saisonalität sowohl bei den Hochwässern als auch bei den mittleren Abflüssen etwas geringer (r = 0,73 im Juli/August, Pk = 2,23 im Juni). Cluster CH8 (graue Punkte in Bild 7) im Wallis setzt sich von den anderen alpinen Gebieten durch einen besonders starken Einfluss der Gletscherschmelze und entsprechend starker Saisonalität der Hochwässer ab (r = 0,86 im Juli/August, Pk = 2,77 im Juni/Juli). Das etwas spätere Auftreten der Hochwässer im Spätsommer ist durch die grössere Seehöhe der Einzugsgebiete zu erklären.

Cluster A4 (blaue Kreuze in Bild 7) ist eine sich west-östlich erstreckende Zone am Nordrand der Alpen mit eher schwacher Saisonalität (r = 0,54 im Juli, Pk = 1,73 im Mai). In dieser Zone dürften orographisch verstärkte synoptische Niederschläge, die eine verhältnismässig geringe Saisonalität aufweisen, wesentliche hochwasserauslösende Prozesse sein. Eine derartige Zone ergibt sich nur in Österreich, nicht aber in der Schweiz. Der Cluster A6 im Süden Österreichs zeigt geringe Saisonalität (r = 0,44, Pk = 1,41), wobei die Hochwässer meist im September und die maximalen Monatsabflüsse meist im Mai auftreten. Der mittlere Auftretenszeitpunkt der Hochwässer im September hebt sich wesentlich von den andern Gebieten in Österreich ab und dürfte sowohl auf Sommergewitter als auch auf Herbstereignisse bei mediterranen Wetterlagen zurückzuführen sein.

Im Norden Österreichs liegen zwei Cluster (A8 graue Punkte und A2 orange Punkte), die eine geringe Saisonalität aufweisen (r = 0,26–0,39 im März/April, Pk = 1,36–1,72 im März/April), wobei der nördlich liegende Cluster A8 eine geringfügig stärkere Saisonalität wegen der etwas grösseren Einzugsgebietshöhen aufweist. In den Clustern A8 und A2 dürfte eine Mischung von Prozessen für die Hochwasserentstehung verantwortlich sein, wie etwa gemischte Regen und Schneeschmelzereignisse. Im Alpenvorland südlich der Cluster A8 und A2 liegt Cluster A1 (graue Dreiecke). Hier weisen die Hochwässer zwar auch eine geringe Saisonalität auf, doch treten sie wesentlich später auf (r = 0,34 im Juli/August). In diesem Cluster dürften sich zusätzlich Sommergewitter auf das Hochwasserverhalten auswirken. Eine ähnliche Situation wie im Norden Österreichs ist im Norden der Schweiz mit Cluster CH3 (grüne Punkte), CH5 (schwarze Punkte) und CH7 (graue Karo) anzutreffen. Diese drei Cluster weisen in der Schweiz die grösste Variabilität im Auftreten der Jahreshochwässer wie auch die grössten Pardé-Koeffizienten auf.

Als Begründung, warum dennoch in drei Cluster unterteilt wurde, ist zum einen für Cluster CH5 die etwas höhere Hochwassersaisonalität (r = 0,44 im April/Mai) und der etwas spätere Zeitpunkt des maximalen Pardé-Koeffizienten (Pk = 1,41 im April) anzugeben.

Dieser Umstand könnte mit den vergleichsweise grösseren Höhenlagen der zugehörigen Einzugsgebiete (im Mittel ca. 750 m ü. M.) erklärt werden, wodurch Cluster CH5 im Gegensatz zu den anderen zwei Clustern nicht ein rein pluviales Regime, sondern auch eine gewisse nivale Komponente zuzuweisen ist. Die Unterschiede zwischen Cluster CH3 (r = 0,32 im März, Pk = 1,45 im März) und CH7 (r = 0,35 im Mai, Pk =1,40 im März) ist auf die Differenz des mittleren Zeitpunktes der Jahreshochwässer zurückzuführen.

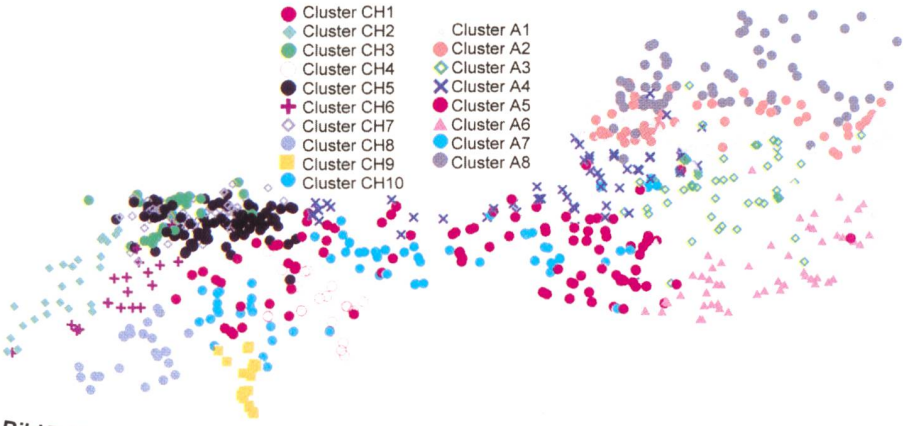

Bild 7. Homogene Regionen in Hinblick auf die hochwasserrelevanten Prozesse in der Schweiz und in Österreich. Ermittelt durch eine Clusteranalyse der Saisonalität der Jahreshochwässer und der mittleren monatlichen Abflüsse.

Insgesamt sind also die Cluster 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 West-Ost-Erstreckung mancher Regionen entspricht der Hauptorientierung der Alpen und ist durchaus plausibel.

5. Statistische Analyse der Jahreshochwässer für die einzelnen Clusterregionen

5.1 Statistische Homogenitätstests

Während die Clusterregionen in Bild 7 auf Basis der Saisonalitätsmasse in Hinblick auf homogene hochwasserauslösende Prozesse ermittelt wurden, ist es auch von Interesse, inwieweit die Hochwasserkollektive in jeder Region als homogen angesehen werden können. In der Literatur stehen eine Reihe von Homogenitätstests zur Verfügung (z. B. Lettenmaier et al., 1987; Hosking and Wallis, 1993; Hipel, 1994). In dieser Arbeit werden die Homogenitätstests nach Dalrymple (1960) und Wiltshire (1986b) verwendet. Dalrymples Test 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. Wiltshires Test ist dagegen nicht nur auf ein bestimmtes Quantil beschränkt, sondern untersucht die Abweichungen der individuellen Verteilungen von der regionalen Verteilungskurve. Diese Abweichungen sind in der Testgrösse R-Test zusammengefasst und sind mit einer kritischen Teststatistik R-kritisch zu vergleichen, die aus einer CH1-Quadrat-Verteilung zu entnehmen ist und in der vorliegenden Arbeit für ein Signifikanzniveau von 5 % bestimmt wurde. Für die Einschätzung der Ergebnisse wurde die Klassifizierung von Hosking and Wallis (1993) übernommen, welche die drei Klassen «akzeptabel homogen», «möglicherweise heterogen» und «definitiv heterogen» unterscheidet. Bei Dalrymples Test wurde dabei so vorgegangen, dass eine Region als «akzeptabel homogen» betrachtet wird, wenn alle HQ_{10} innerhalb der Konfidenzgrenzen liegen, «möglicherweise heterogen», wenn nur vereinzelte Stationen an oder knapp ausserhalb der Konfidenzgrenzen liegen, und «definitiv heterogen», wenn mehrere Stationen ausserhalb der Konfidenzgrenzen liegen. Beim Wiltshire-Test erfolgt die Einstufung derart, dass eine Region

als «akzeptabel homogen» betrachtet wird, wenn die Testgrösse R-Test kleiner als der Wert R-kritisch ist, «möglicherweise heterogen», wenn R-Test zwischen R-kritisch und 1,25 × R-kritisch liegt, und «definitiv heterogen», wenn R-Test grösser als 1,25 × R-kritisch ist.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Daraus ist zu erkennen, dass nur wenige Regionen hinsichtlich der durchgeführten statistischen Tests als homogen angesehen werden können. Insbesondere ist es lediglich Cluster CH9 (Tessin, ohne Nordtessin), welcher von beiden Tests als akzeptabel homogen eingestuft wird. Eine Vermutung für die grössere Homogenität dieses Gebietes ist die eindeutigere Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen von Südanströmungen, während andere alpine Gebiete stärker durch eine Übergangslage mit weniger eindeutig zuzuordnenden meteorologischen Einflussrichtungen zu charakterisieren sind. Was die naturräumliche Ausstattung betrifft, so sind die Einzugsgebiete dieses Clusters kaum von Vergletscherungen betroffen, während bei den anderen alpinen Gebieten der Vergletscherungsgrad der einzelnen Einzugsgebiete stark schwankt und somit die grössere Vielfalt von relevanten Prozessen für grössere Heterogenität sorgt.

Es ist jedoch festzuhalten, dass die Aussagekraft aller statistischen Homogenitätstests stark von der Anzahl der Stationen pro Region und der Messreihenlänge der Stationen abhängt. Regionen mit wenigen Stationen und kurzen Reihen werden tendenziell eher als homogen eingestuft, da nicht genügend Information vorliegt, um die Hypothese der Homogenität abzulehnen. In der Tat bestehen die in Tabelle 3 als homogen angeführten Cluster aus verhältnismässig wenigen Stationen mit kurzen Reihen. Angesichts dieser Tatsache ist daher die Bedeutung dieser statistischen Tests zu relativieren. Auch können solche Tests klarerweise nur die Homogenität der Stichproben testen, während für die Regionalisierung eigentlich die Homogenität der Grundgesamtheit von Interesse ist. Bei kurzen Reihen wirken sich einzelne Ausreisser besonders auf die Variabilität der höheren Momente der Stichprobe aus. Ein Teil der in Tabelle 3 angeführten Heterogenität könnte also nicht nur natürliche räumliche Heterogenität sein, sondern Variabilität zufolge der verhältnismässig kurzen Stichproben. In diesem Zusammenhang muss auch auf die Fehlerbehaftung der Abflussdaten hingewiesen werden. Aufgrund von Unsicherheiten im Pegelschlüssel (Wasserstands-Abflussbeziehung) ist gerade bei Hochwässern, bei denen meist eine Extrapolation dieser Beziehung vorgenommen werden muss, erhebliches Fehlerpotential gegeben. Diese Fehlerquelle kann also ein weiterer Grund für die Variabilität in Tabelle 3 sein. Die verwendeten Daten wurden zwar in einer Plausibilitätskontrolle auf grobe Fehler hin untersucht, mögliche Abweichungen infolge unsicherer Pegelbeziehungen wurden in der vorliegenden Studie aber nicht berücksichtigt.

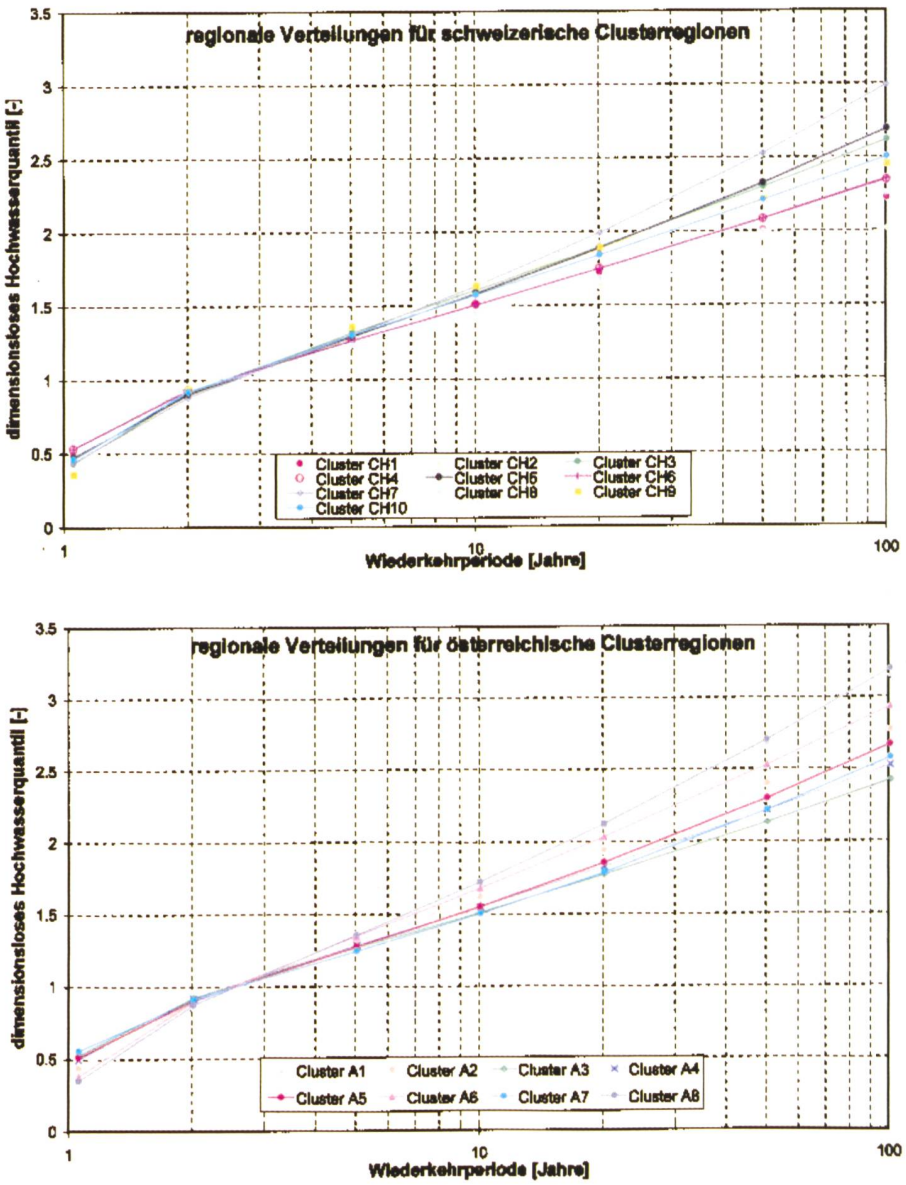

Bild 8. Regionale dimensionslose Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven («growth curves») der Clusterregionen aus Abbildung 6 für (a) die Schweiz und (b) Österreich.

5.2 Regionale Verteilungskurven der Clusterregionen

Für die einzelnen Clusterregionen wurden die regionalen dimensionslosen Verteilungsfunktionen (d. h. die «growth curves») der Jahreshochwässer ermittelt. Als Verteilungstyp wurde dabei die Allgemeine Extremwertverteilung gewählt. Für jede Station wurden die zweiten und dritten Momente der Jahreshochwässer berechnet, mit der Messreihenlänge gewichtet und schliesslich innerhalb der Region arithmetisch gemittelt. Daraus wurden die Verteilungsparameter der regionalen Kurve geschätzt. Bilder 8 a und b zeigen die regionalen Kurven der Clusterregionen für die Schweiz und Österreich. Bemerkenswert ist, dass in beiden Ländern die steileren Kurvenverläufe den Regionen der niedrigeren Höhenstufen zugeordnet werden können, während die alpin geprägten Regionen die flacheren Kurvenverläufe besitzen. In Österreich haben insbesondere die Cluster A8 (Mühlviertel, Waldviertel) und A1 (Alpenvorland) verhältnismässig steile Kurvenverläufe und damit einen verhältnismässig grossen Variationskoeffizienten cv. Hydrologisch sind dies Gebiete, die im Vergleich zu den alpinen Gebieten insgesamt trockener sind und geringere Abflussspenden aufweisen. Eine geringere Vorbefeuchtung der Gebiete wirkt sich jedoch im allgemeinen in einem grösseren Variationskoeffizienten der Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilungen aus, wie Test-

Cluster-region	Lage	Anzahl der Stationen	Bestimmtheitsmass
CH1	niedere Gebiete der Zentralalpen	23	0,87
CH2	Jura	22	0,74
CH3	nördliches Mittelland	23	0,90
CH4	Graubünden	22	0,82
CH5	nördliches Alpenvorland	61	0,88
CH6	westliches Alpenvorland	20	0,89
CH7	Nordschweiz	37	0,86
CH8	Wallis	23	0,92
CH9	Tessin, ohne Nordtessin	18	0,91
CH10	Zone südwestlich von Graubünden	21	0,59
A1	Alpenvorland und Teile Burgenlands	74	0,37
A2	Alpenvorland	50	0,55
A3	Steiermark	51	0,87
A4	Nordrand der Alpen	54	0,81
A5	niedere Gebiete Tirols, Pinzgau, westliches Kärnten	73	0,90
A6	Kärnten und südliche Steiermark	52	0,77
A7	hochgelegene Gebiete Tirols	48	0,77
A8	Mühlviertel, Waldviertel	68	0,38

Tabelle 4. Bestimmtheitsmass der logarithmisch transformierten linearen Beziehung zwischen dem mittleren Jahreshochwasser und der Einzugsgebietsfläche getrennt für jede Clusterregion.

rechnungen mit Methoden der abgeleiteten Hochwasserstatistik gezeigt haben (z.B. Blöschl und Sivapalan, 1997). In der Schweiz weisen die Cluster CH3, CH5 und CH7 (alle drei im nördlichen Mittelland bzw. nördlichen Alpenvorland) die steilsten Kurvenverläufe (grosser cv) auf. Als eine Erklärung mag der zuvor geschilderte Sachverhalt dienen. Als alternative Erklärung könnte für einige Einzugsgebiete auch gelten, dass eine Zwei-Komponenten-Verteilung vorliegt, d.h. dass ab einer gewissen Jährlichkeit ein Knick bzw. eine Zunahme der Steilheit in der Verteilungskurve zu beobachten ist. Begründet werden kann dies mit der Begrenzung des Wasserspeichervermögens der Böden, so dass es bei den extremsten Niederschlagsereignissen nach der Infiltration einer gewissen Niederschlagsmenge (in Abhängigkeit von der Vorbefeuchtung) zu einer Erschöpfung des Bodenspeichers kommt und Teile des Einzugsgebietes relativ sprunghaft ihren Abflussbeitrag erhöhen (Konzept der variabel beitragenden Flächen, siehe Hewlett and Nutter, 1970). Es dürfte aber auch die in Abschnitt 4 postulierte Vielfalt der relevanten, an der Hochwasserentstehung beteiligten Prozesse in diesen Gebieten für die grössere Variabilität verantwortlich zu machen sein. Einen besonderen Fall stellt die Juraregion im Westen der Schweiz dar (Cluster CH2), die den flachsten Kurvenverlauf aufweist. Wie bereits in Abschnitt 3 bei der Erläuterung des Saisonalitätsverhaltens festgehalten, wird vermutet, dass im Jura ein besonders ausgeprägtes Infiltrations- und Wasserspeichervermögen vorliegt. Die damit verbundene Pufferwirkung würde dann bewirken, dass auch bei extremen Regenmengen und -intensitäten nur eine geringe Zunahme der Abflussspende erfolgt, was die geringere Variation der Jahreshochwässer erklären würde.

5.3 Index-flood-Beziehung für die einzelnen Clusterregionen

Sollen Hochwasserwerte für unbeobachtete Gebiete mit Hilfe des Index-flood-Ansatzes auf Basis homogener Regionen wie etwa in Bild 7 berechnet werden, ist es notwendig, den Index flood (zumeist das mittlere Jahreshochwasser) zu bestimmen und damit die «growth curve» zu multiplizieren. Als erster Schritt dafür soll in dieser Arbeit nur eine einfache Regressionsbeziehung zwischen dem mittleren Jahreshochwasser $E[HQ]$ und der Einzugsgebietsfläche A in der Form

$$E[HQ] = x \cdot A^y \qquad (2)$$

untersucht werden. Diese Beziehung wurde für jede Region getrennt aufgestellt. Die Variablen $E[HQ]$ und A wurden logarithmisch transformiert und das Bestimmtheitsmass der nun linearen Beziehung ermittelt. Das Bestimmtheitsmass gibt Aufschluss über die Güte der Anpassung und damit über die Zuverlässigkeit, mit der das mittlere Jahreshochwasser für unbeobachtete Gebiete aus einer solchen Beziehung abgeleitet werden kann. Gleichzeitig gibt das Bestimmtheitsmass Aufschluss über die hydrologische Heterogenität der Region in Hinblick auf das mittlere Jahreshochwasser, denn für homogene Regionen sind gute Korrelationen (d.h. ein grosses Bestimmtheitsmass) zu erwarten.

Tabelle 4 zeigt dieses Bestimmtheitsmass für die Clusterregionen in der Schweiz und in Österreich. Die Güte der Korrelation ist von Region zu Region sehr verschieden. In mehreren Regionen erreicht das Bestimmtheitsmass einen Wert um 0,90, der wahrscheinlich für viele Anwendungen als ausreichend genau einzustufen ist. Zu diesen Regionen zählen etwa Teile Nordtirols sowie in der Schweiz das Wallis, das Tessin und Teile des nördlichen Mittellandes. Allerdings dürfte in anderen Regionen die Einzugsgebietsfläche als alleinige Prädiktorvariable nicht ausreichend sein. Zu diesen Regionen zählen in Österreich etwa das Mühlviertel, das Waldviertel und Teile des Alpenvorlands. Dies sind auch die Gebiete, die von den Homogenitätstests als besonders heterogen ausgewiesen wurden und für die die Saisonalitätsanalyse in den Bildern 3 bis 6 ein eher heterogenes Bild zeigt. Hier ist eine feinere Unterscheidung der Regionen notwendig. In der Schweiz ist das Niveau des Bestimmtheitsmasses generell etwas höher – lediglich das Gebiet südwestlich von Graubünden (Zone nördlich des Gotthards bis südlich des San Bernardino) und der Jura zeigen etwas geringere Masse an –, was durch die bereits grössere Differenzierung (mehr Cluster bei geringerer Gesamtfläche) erklärbar ist.

6. Diskussion und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde, Piock et al. (1999a, b) folgend, die These aufgestellt, dass die Saisonalität von hydrologischen Grössen auf hochwasserauslösende Prozesse und damit auf das Hochwasserverhalten schliessen lässt, wodurch sich homogene Regionen für die Regionalisierung von Hochwässern bestimmen lassen. Die Analyse der Saisonalität in Österreich und der Schweiz zeigte, dass eine synoptische Zusammenschau eine gute Beurteilung der regionalen Verteilung dieser Prozesse erlaubt. Zu diesen Prozessen zählen konvektive Niederschläge und orographische Niederschläge, Schneeschmelze und Gletscherschmelze sowie häufiges Auftreten bestimmter Wetterlagen. Während diese Beurteilung die hydrologischen Prozesse freilich nicht derart detailliert erkennen lässt wie etwa Prozessstudien in Versuchseinzugsgebieten, ergibt sie dennoch ein synoptisches Gesamtbild, das insbesondere für die Ableitung von Regionen gut geeignet sein dürfte, da es dabei vor allem um die Unterschiede zwischen den Regionen und in geringerem Masse um die absoluten Werte innerhalb der Regionen geht.

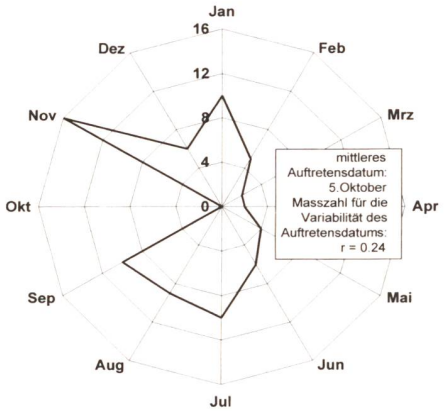

Bild 9. Häufigkeitsverteilung des Auftretensdatums der Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge für die Station Areuse im Schweizer Jura (Cluster CH2); Aufzeichnungslänge: 80 Jahre.

Als Masszahlen wurden Mittelwerte des Auftretensdatums der Hochwässer und Mittelwerte der maximalen Monatsabflüsse verwendet. Für den Niederschlag wurden in analoger Weise Mittelwerte verwendet. Diese Masszahlen erwiesen sich insgesamt als geeignet. Allerdings kann durch die Mittelbildung besonders bei bimodalen Verteilungen Information verlorengehen. Exemplarisch ist dies in Bild 9 anhand der zeitlichen Häufigkeitsverteilung der Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge einer Messstation aufgezeigt. Bei dieser Messstation liegt das rechnerisch mittlere Auftretensdatum in einem Monat, in dem kein einziges Einzelereignis stattgefunden hat. Die Streuung des Auftretensdatums schlägt sich allerdings in einem entsprechend geringen *r*-Wert nieder. Für derartige Verhältnisse wäre eine getrennte Betrachtung der beiden Modi sicherlich für die Analyse der Prozesse aufschlussreicher.

In einem zweiten Schritt wurden unter Verwendung dieser Saisonalitätsmasszahlen mit Hilfe einer Clusteranalyse homogene Regionen bestimmt. Insgesamt sind die so ermittelten Regionen plausibel. Die Regionen stimmen einigermassen mit den unterschiedlichen naturräumlichen und hydrometeorologischen Gegebenheiten sowie mit den geologischen Verhältnissen überein. Allerdings kann die Clusteranalyse nicht alle Feinheiten erfassen, die durch eine synoptische Betrachtung der Saisonalität in den Bildern 3 bis 6 erkennbar sind. Beispielsweise zeigt Bild 4 für das Gailtail im äussersten Süden Österreichs im Vergleich zu den benachbarten Gebieten sehr unterschiedliche Verhältnisse, während die Clusteranalyse das Gailtal nicht als getrennte Region ausweist. Ein ähnlicher Fall liegt etwa für die grundwasserdominierten Vorfluter südlich von Wien vor. In der Schweiz betrifft dies z. B. den nach Süden exponierten Teil des Wallis südlich des Simplon, der ein vom Gesamtcluster Wallis (CH8) abweichendes Saisonalitätsverhalten zeigt. Hier ist die Clusteranalyse zu grob. Testrechnungen ergaben, dass eine Erhöhung der Anzahl der Cluster nur teilweise Abhilfe schafft. Günstiger dürfte es sein, das hier vorgeschlagene Verfahren durch eine manuelle Analyse zu ergänzen, wobei dann für jeden Einzelfall unter Verwendung der Saisonalität aber auch von anderen Informationen geprüft werden kann, welcher Region eine Station zuzuordnen ist. Als zusätzliche Information könnte etwa regionale Information, wie unterschiedliche Intensitäten von kürzeren Starkniederschlägen, zur besseren Unterscheidung konvektiver und synoptischer Ereignisse oder die Konzentrationszeit der Einzugsgebiete verwendet werden. Die Regionen in Bild 7 überlappen sich teilweise und erschweren eine Zuordnung eines Einzugsgebietes ohne Beobachtung zu einer Region. Auch hier könnten ergänzende manuelle Analysen zu einer eindeutigeren Abgrenzung der Regionen führen.

Für die mit der Clusteranalyse bestimmten Regionen wurden die Kollektive der Jahreshochwässer untersucht. Statistische Homogenitätstests deuten darauf hin, dass die meisten Regionen in Hinblick auf die Jahreshochwässer als nicht homogen anzusehen sind, doch besitzen derartige Tests wegen des Einflusses der Anzahl der Stationen pro Region und der Reihenlänge nur eine beschränkte hydrologische Aussagekraft. Die mittleren normierten Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilungen (d. h. die «growth curves») für jede Region zeigen zwischen den Regionen eher geringe Unterschiede. Sowohl für Österreich als auch für die Schweiz ist etwa das normierte 100jährliche Hochwasser in der Region mit der steilsten «growth curve» nur 50 % grösser als in der Region mit der flachsten «growth curve». Das sind in Vergleich zu anderen Ländern (siehe z. B. NERC, 1975) verhältnismässig kleine Unterschiede. Auch diese Ergebnisse sind wegen der verhältnismässig kurzen Reihenlänge in Hinblick auf Extremereignisse nicht überzubewerten, doch könnte eine ergänzende manuelle Analyse weiter verbesserte Regionen mit grösseren Unterschieden ergeben. Die Korrelationen zwischen dem mittleren jährlichen Hochwasser und der Einzugsgebietsfläche sind hingegen verhältnismässig hoch. Dies unterstreicht die Plausibilität der hier gefundenen Regionen. Wünschenswert wäre freilich ein quantitativer Test dieser Regionen im Vergleich zu alternativen Ansätzen auf Basis von langen Abflussreihen für kleine Einzugsgebiete.

Dank

Für finanzielle Unterstützung wird der European Commission DG XII (Projekt Nr. ENV4-CT97-0529), der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Projekt Nr. HOE 12/97) sowie dem eidgenössischen Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (Projekt Nr. 97.0050) gedankt. Prof. D. Gutknecht (TU Wien) und Dr. D. Grebner (ETH Zürich) sind wir für wertvolle Hinweise zu den hier beschriebenen Arbeiten dankbar.

Literatur

Aschwanden, H., R. Weingartner und C. Leibundgut (1986): Zur regionalen Übertragung von Mittelwerten des Abflusses. Deutsche Gewässerkundl. Mitt., 30, 52–99.

Blöschl, G., and *M. Sivapalan* (1997): Process controls on regional flood frequency: Coefficient of variation and basin scale. Water Resour. Res., 33 (12), 2967–2980.

Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Merz, R., und *Gutknecht, D.* (1999): Prozessorientierte Regionalisierung von Hochwässern, Schriftenreihe des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Tagungsband «Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete», Heft 9, 267–285.

Burn, D. H. (1990): Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. Water Resour. Res., 26 (10), 2257–2265.

Burn, D. H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. J. Hydrol. 202, 212–230.

Cunnane, C. (1988): Methods and merits of regional flood frequency analysis. J. Hydrol., 100, 269–290.

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.

Hipel, K. W. (1994) (ed.): Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol. 1 Extreme values: floods and droughts. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 416 pp.

Hewlett, J., Nutter, W. (1970): The varying source area of streamflow from upland basins. Proc. Symposium on Watershed Management. ASCE, 65–83.

Hosking, J. R. M., and *Wallis, J. R.* (1993): Some statistics useful in regional frequency analysis, Water Resour. Res., 29 (2), 271–281.

Kaufman, L., and *Rousseeuw, P. J.* (1990): Finding groups in data. John Wiley, New York, p. 39.

Kohnova, S., and *Szolgay, J.* (1999): Regional estimation of design summer flood discharges in

small catchments in northern Slovakia. IAHS Publ. no. 255, 265–268.
Kresser, W. (1965): Österreichs Wasserbilanz. Österr. Wasserwirtschaft, 17, 213–221.
Kürsteiner, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lüen. Schweiz. Bauzeitung, 1: 4–8.
Lettenmaier, D. P., Wallis, J. R., and *Wood, E. F.* (1987): Effect of heterogeneity on flood frequency estimation, Water Resour. Res., 23 (2), 313–323.
Melli, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. Schweiz. Bauzeitung, 12: 137–141.
Merz, R., Piock-Ellena, U., Blöschl, G., and *Gutknecht, D.* (1999): Seasonality of Flood Processes in Austria. IAHS Publ. no. 255, 273–278.
Pardé, M. (1920): Le régime des cours d'eau en Suisse. Revue de géographie alpin, VIII, 359–457.
Piock-Ellena, U., und *Blöschl, G.* (1998): Abflusstypenklassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Zwischenbericht 1998, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-12/97+98). Institut für Hydraulik, TU Wien.
Piock-Ellena, U., Merz, R., Blöschl, G., and *Gutknecht, D.* (1999a): On the regionalisation of flood frequencies – Catchment similarity based on seasonality measures. XXVIII IAHR Proceedings, CD-ROM: 434.htm.
Piock-Ellena, U., Merz, R., Blöschl, G., and *Gutknecht, D.* (1999b): SAFE method – Seasonality Analysis for regional Flood Estimation. Geophysical Research Abstracts. European Geophysical Society. Volume 1, Number 4, p. 870.
Rosso, R. (ed.), (1999): Framework – Flash-flood Risk Assessement under the impacts of land use changes and river engineering works, First Annual Report of the EC project ENV4-CT97-0529, technical report, Dept. of Hydraulic, Environmental and Surveying Engineering, Politecnico di Milano.
Wiltshire, S. E. (1986a): Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis. J. Hydrol., 84, 287–302.
Wiltshire, S. E. (1986b): Regional flood frequency analysis I: Homogeneity statistics, Hydrologic. Sci. J., 31 (3), 321–333.
Wundt, W. (1950): Die grössten Abflussspenden in Abhängigkeit von der Fläche. Die Wasserwirtschaft, 40, 59–64.

Adressen der Verfasser
Mag. *Ulrike Piock-Ellena,* A. o. Univ. Prof. Dr. *Günter Blöschl,* Dipl.-Ing. *Ralf Merz,* Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/223, A-1040 Wien.
Dipl.-Ing. *Martin Pfaundler,* Prof. Dr. *Paolo Burlando,* IHW – Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

Der Orkan «Lothar»

Extrem hohe Böenspitzen auf der ganzen Alpennordseite

Als die Medien damals den Orkan «Vivian» vom 27. Februar 1990 als Jahrhundertsturm bezeichneten, hielt es wohl kaum jemand für möglich, dass noch vor Ende dieses Jahrhunderts ein noch gewaltigerer Orkan unser Land treffen würde. Was die Meteorologen dann aber am 26. Dezember 1999 auf der morgendlichen Wetterkarte fanden, beunruhigte auch die Erfahrensten unter ihnen. Die Karte zeigte nämlich auf die kurze Distanz zwischen Zürich (Luftdruck rund 1000 hPa reduziert auf Meereshöhe) und Paris (960 hPa) die unglaubliche Druckdifferenz von rund 40 hPa. Da wussten die Meteorologen, dass ein schwerer Orkan mit Böenspitzen bis 80 Knoten (gleich rund 145 km/h) zu erwarten war. Entsprechend wurden mehrmals Warnungen vor dem schweren Sturm ausgegeben. Am besagten Stephanstag über Mittag fegte der Orkan «Lothar» dann über die Alpennordseite und übertraf die schlimmsten Befürchtungen. Ausser in der Südschweiz, wo das Wetter ruhig blieb, und ausser den inneralpinen Regionen Graubündens und des Wallis, welche nur randlich vom Orkan betroffen wurden, erreichten die Böenspitzen fast flächendekkend extreme Werte. Einzig im westlichen Mittelland und am Genfersee gab es nur strichweise Orkanwinde über 120 km/h. In den übrigen Gebieten der Alpennordseite wurden vielerorts mehr als 140 km/h, vereinzelt über 160 km/h gemessen – wohlverstanden in den Niederungen. Mit ungeheurer Wucht traf der Orkan insbesondere die Stationen Vaduz (165 km/h), Delémont (170 km/h) und Brienz (181 km/h). In etwas erhöhten, windexponierten Lagen wurden teils noch weit gewaltigere Böen registriert. Auf dem Üetlibergturm waren es unglaubliche 241 km/h (Bild 1).

Die Entstehung des Orkans «Lothar»

Auf die Weihnachtstage hin entwickelte sich über dem Nordatlantik ein mächtiges Tief, welches «Kurt» getauft wurde. An seiner Südflanke herrschte eine stürmische Westströmung. Über dem Atlantik entstand solchermassen eine langgestreckte Zone starker Temperaturgegensätze (kalt im Norden, warm im Süden). In dieser langgestreckten, West-Ost-gerichteten Luftmassen-Grenzzone entwickelte sich am Weihnachtstag nordwestlich der Azoren der Randwirbel «Lothar».

Bis am Morgen des Stephanstags hatte er bereits Frankreich erreicht und sich massiv verstärkt. Im Raum Paris wurde der selten tiefe Luftdruck von 960 hPa gemessen,

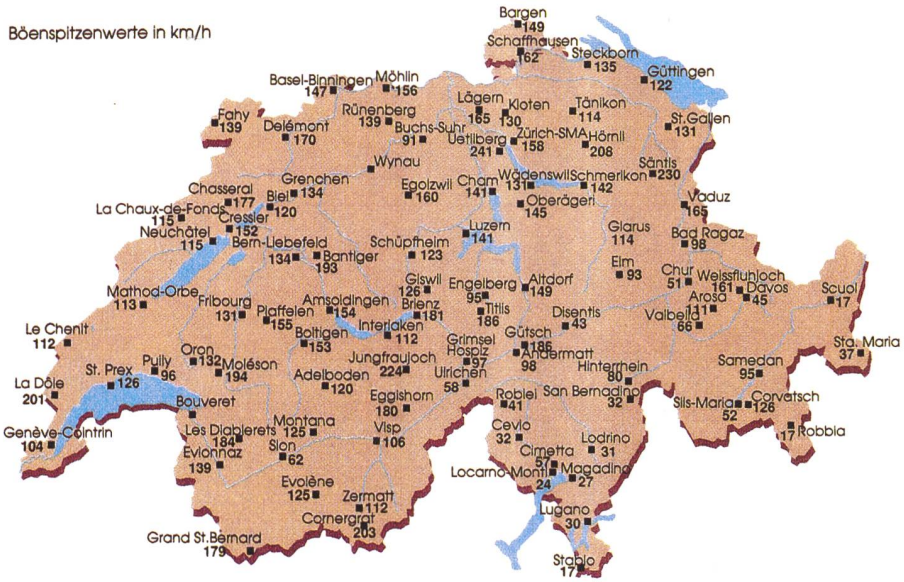

Bild 1. Maximale Böenspitzen einiger Stationen der SMA-MeteoSchweiz während des Orkans «Lothar» am 26. Dezember 1999. Als Böenspitze wird die höchste, über die Dauer von 1 Sekunde gemittelte Windgeschwindigkeit bezeichnet.