Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft

Jahrgang 51

Wien, November/Dezember 1999

Heft 11/12

Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich

Applicability of the Gradex-Method in Austria

Von R. Merz, G. Blöschl und U. Piock-Ellena

Kurzfassung/Summary

Das Gradex-Verfahren ist als ein einfaches und robustes Verfahren zur Abschätzung von Bemessungshochwässern mit gegebener Jährlichkeit konzipiert. Das Verfahren wird auf ganz Österreich angewendet, wobei für die beiden wichtigsten Parameter des Verfahrens, den Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag und den r-Wert, der die Abflussdynamik beschreibt, einfache Annahmen getroffen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung des Gradex-Verfahrens mit dem derzeitigen Wissensstand für österreichische Verhältnisse zwar aus verschiedenen Gründen attraktiv ist und der traditionellen Hochwasserstatistik vorzuziehen ist, die damit ermittelten Hochwasserabflüsse aber nur grobe Schätzwerte darstellen. Für eine quantitative Anwendung zur Bestimmung von Bemessungsabflüssen müssten die Parameter des Gradex-Verfahrens (insbesondere der r-Wert und der Flächenabminderungsfaktor) durch zusätzliche Auswertungen genauer bestimmt werden. Auch eine Verbesserung der Modellstruktur in Richtung eines umfassenderen Modells der abgeleiteten Hochwasserstatistik ist wünschenswert, um damit die Struktur des Hochwasserverhaltens in Österreich auf regionaler Basis besser wiedergeben zu können.

The Gradex method is a simple and robust approach to flood frequency estimation. We applied the method to Austria in a regional mode. We made simple assumptions about the two main parameters of the method, the r-parameter which represents runoff dynamics, and the areal reduction factor of rainfall. The results indicate that overall the method gives more reliable flood estimates than traditional flood frequency methods do, as it represents the most important rainfall-runoff processes in an albeit simplified way. However, there is significant uncertainty associated with the model parameter values, and the model structure is not fully consistent with the flood response of Austrian catchments. We therefore suggest that a more complete derived flood frequency model is needed for regional mapping of flood frequencies in Austria. Also, additional data analyses are needed for accurately specifying model parameters.

1. Einleitung

Bemessungsabflüsse im Wasserbau sind heute oft für sehr große Jährlichkeiten zu ermitteln. In der Vergangenheit wurden Bemessungsabflüsse meist mit Hilfe von Verfahren der Hochwasserstatistik bestimmt. Dabei wird an gemessene Hochwasserkollektive (z. B. Reihen der Jahreshöchstwerte) eine statistische Verteilungsfunktion (z. B. Gumbel, Pearson III oder Log-Pearson III) angepasst und auf die erforderliche Jährlichkeit extrapoliert (DVWK, 1979). Allerdings sind in der Praxis die vorhandenen Reihen der Abflussdaten sehr kurz im Vergleich zur geforderten Jährlichkeit. Eine Extrapolation führt dann zu sehr großen Unsicherheiten. In der Literatur (z. B. DVWK, 1988) wird eine Extrapolation nur bis zum Zwei- oder Dreifachen der Dauer der zugrundeliegenden Abflussmessreihe als zulässig angesehen. Da in Osterreich die typische Länge der Abflussreihen ungefähr 30 Jahre beträgt, ist eine Ermittlung von Bemessungsabflüssen mit einer Jährlichkeit von 1000, 5000 oder 10000 Jahren mit Hilfe traditioneller Hochwasserstatistik nicht zulässig.

Zur Verbesserung der Extrapolation der Abflüsse auf große Jährlichkeiten wurden in der Literatur zahlreiche Methoden vorgeschlagen, wie etwa die Verwendung regionaler Information aus benachbarten Einzugsgebieten (Blöschl et al., 1999; Rosso, 1999) oder das Einbeziehen der Gebietskenntnis von Fachleuten (Kirnbauer, 1981). Eine weitere häufig verwendete Methode ist das Einbeziehen von Prozessverständnis über den Niederschlag-Abflussprozess. Ein derartiger Ansatz hat den Vorteil, dass - im Gegensatz zu einer rein statistischen Extrapolation - Wissen über geänderte hydrologische Bedingungen eingebracht werden kann. Bei extremen Hochwässern sind die Abflussprozesse meist grundsätzlich anders als bei kleinen und mittleren Hochwässern (Klemeš, 1993; Gutknecht, 1994). Die Abflussbildung ist anders, denn oft ist ein großer Teil des Einzugsgebietes gesättigt, während bei kleineren Ereignissen oft nur ein kleiner Teil des Gebiets (in der Nähe des Vorfluters) zum Abfluss beiträgt. Auch die Abflusskonzentration ist anders, denn die Fließpfade sind meist an der Oberfläche oder sehr nahe der Oberfläche, während bei kleineren Ereignissen die Fließpfade oft tiefer im Untergrund sind. Derartige Unterschiede lassen sich durch eine explizite Nachbildung der Niederschlag-Abflussprozesse, etwa durch physikalisch fundierte Niederschlag-Abflussmodelle, wiedergeben (Blöschl, 1996b). Allerdings ist es in der Praxis oft schwierig, zutreffende Parameter für diese Modelle zu finden, und deshalb kommen

meist deterministische Konzeptmodelle zur Anwendung. Das Ergebnis solcher Berechnungen ist eine Bemessungswelle des Abflusses. Für sehr extreme Ereignisse entsprechend sehr großen Jährlichkeiten werden solche Bemessungswellen als "Wahrscheinlich Größtes Hochwasser" (Probable Maximum Flood, PMF) bezeichnet, das durch Transformation des "Wahrscheinlich Größten Niederschlages" (Probable Maximum Precipitation, PMP) in einen Abfluss mit Hilfe eines Niederschlag-Abflussmodells ermittelt wird (Gutknecht et al., 1995).

Der Nachteil dieser PMF-Ansätze ist allerdings, dass für jeden Bemessungsfall eine detaillierte hydrologische Studie erforderlich ist. Sowohl die meteorologischen, hydrologischen als auch hydrogeologischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets sind einer genauen Analyse zu unterziehen, bevor gesicherte Aussagen getroffen werden können. Dies ist mit einem verhältnismä-Big großen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. In manchen Fällen ist es jedoch wünschenswert, mit einfacheren Methoden rasch zu näherungsweisen Aussagen zu kommen, die etwa für Vorbemessungen verwendet werden können. Insbesondere sind einfache Methoden erforderlich, wenn flächendeckende Aussagen über Hochwässer mit großen Jährlichkeiten für Regionen wie etwa ganz Österreich getroffen werden sollen. Eine Möglichkeit dafür sind Methoden der regionalen Hochwasserstatistik (Blöschl et al., 1999), die aber bisher im Allgemeinen die hochwasserwirksamen Prozesse nicht im Detail beschreiben. Eine andere Möglichkeit stellen Verfahren dar, die eine Niederschlagsstatistik mit einem deterministischen Niederschlag-Abflussmodell kombinieren. Diese kombinierten Ansätze wurden in der Literatur unter dem Namen "abgeleitete Hochwasserstatistik" bekannt (z. B. Eagleson, 1972; Tavakkoli, 1985; Blöschl and Sivapalan, 1997). Ein Vorteil dieser Ansätze ist auch, dass sich damit Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Bemessungshochwasser treffen lassen. Ein sehr einfaches Verfahren, das zur Kategorie der abgeleiteten Hochwasserstatistik zählt, ist das Gradex-Verfahren, das für die praktische Ermittlung von Bemessungshochwässern in einigen Ländern (z. B. Frankreich) seit Jahren verwendet wird. Im Prinzip sollte es möglich sein, mit diesem Verfahren rasch näherungsweise Aussagen über das Bemessungshochwasser zu erhalten. Allerdings ist es bislang nicht klar, ob dieses Verfahren auch für österreichische Verhältnisse anwendbar ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens für österreichische Verhältnisse zu untersuchen. Insbesondere soll überprüft werden, ob das Verfahren die in Österreich vorherrschenden Abflussprozesse in befriedigender Weise wiedergeben kann und bei der in Österreich vorliegenden Datensituation anwendbar ist bzw. welche Zusatzerhebungen notwendig wären. Weiters soll ein Vergleich des Verfahrens mit der traditionellen Hochwasserstatistik angestellt wer-

den, um Aussagen über die Extrapolierbarkeit mit beiden Verfahren auf sehr große Jährlichkeiten zu erhalten. Das Schwergewicht in dieser Arbeit liegt nicht bei der Ermittlung von konkreten Bemessungswerten, sondern auf einer Analyse der Methode, die zur Bestimmung solcher Bemessungswerte führen kann.

2. Das Gradex-Verfahren

2.1 Methode

Das Gradex-Verfahren ist ein einfaches und robustes Verfahren zur Berechnung von Hochwasserabflüssen in Einzugsgebieten mit einer Fläche von einigen Dutzend bis zu 5000 km² und einer Reaktionszeit von 1 Stunde bis zu 4 Tagen (Guillot, 1972, 1993; Duband et al., 1994). Die Grundidee des Verfahrens besteht in der Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einem deterministischen Niederschlag-Abflussmodell und einer Hochwasserstatistik. Beim Niederschlag-Abflussmodell wird angenommen, dass in jedem Einzugsgebiet eine durchschnittliche maximale Speicherkapazität bei einer Jährlichkeit Tg erreicht wird. Die Speicherkapazität ist die Differenz zwischen dem Gebietsniederschlag und dem zum Hochwasser beitragenden Direktabflussvolumen und kann somit als eine Art Verlust angesehen werden. Wird bei einem extremen Niederschlagsereignis die maximale Speicherkapazität erreicht (d. h. das Gebiet kann als vollständig gesättigt angesehen werden), so trägt jeder zusätzliche Niederschlag gänzlich zu einem zusätzlichen Abflussvolumen bei, also

$$Qm_T - Qm_{Tg} = (N_T^{\text{Geb}} - N_{Tg}^{\text{Geb}}) \cdot A. \tag{1}$$

Dabei ist Qm_T der mittlere Abfluss während eines Zeitintervalls H (d. h. das Abflussvolumen geteilt durch das Zeitintervall H, siehe Abb. 1) dem eine Jährlichkeit T größer als Tg zugeordnet ist, und Qm_{Tg} ist der entsprechende Wert bei einer Jährlichkeit Tg (also bei Erreichen der Sättigung). N_T^{Geb} bzw. N_{Tg}^{Geb} ist der Gebietsniederschlag, während eines Zeitintervalls H, der einer Jährlichkeit T bzw. Tg zugeordnet ist. A ist die Einzugsgebietsfläche. Gleichung (1) ist dimensionsrein und ist intuitiv nachzuvollziehen. Allerdings hat sie keine statistisch-theoretische Basis, da die Abflüsse und Niederschläge in der Gleichung Zufallsvariablen sind, die deterministisch interpretiert werden. Dies ist streng genommen nicht zulässig, denn die Jährlichkeit des Abflusses ist im Allgemeinen nicht gleich der Jährlichkeit des diesen Abfluss auslösenden Niederschlags (Blöschl und Sivapalan, 1997b). Gleichung (1) ist deshalb als empirischer Bestandteil des Gradex-Verfahrens anzusehen. Das Abflussvolumen wird im Gradex-Verfahren nun durch eine einfache Beziehung in einen Abflussscheitel Qs umgerechnet (Abb. 1):

$$Qs_T = r \cdot Qm_T$$
 bzw.
 $Qs_{Tg} = r \cdot Qm_{Tg}$. (2)

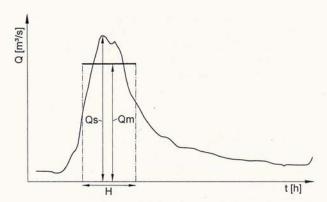


Abb. 1. Berechnung des r-Wertes als Verhältnis von Scheiteldurchfluss Qs zu mittleren Abfluss Qm. H ist das Bezugszeitintervall

Bei gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilung des Gebietsniederschlags, bei gegebenem Abflussscheitel Qs_{Tg} entsprechend einer Jährlichkeit Tg sowie bei bekanntem r-Parameter lässt sich nun aus Gln. (1) und (2) der Abfluss für jede Jährlichkeit T > Tg berechnen. Dieser Ansatz ist zwar ein sehr einfaches Niederschlag-Abflussmodell, doch besitzt er den formalen Vorteil, dass der Ereignisabflussbeiwert nicht bekannt sein muss, da das Niederschlag-Abflussmodell nur auf den zusätzlichen Niederschlag nach Erreichen der Sättigung angewendet wird.

Für Jährlichkeit kleiner oder gleich Tg wird der Abfluss mit Hilfe einer traditionellen Hochwasserstatistik aus dem beobachteten Kollektiv der Jahreshöchsthochwässer berechnet. Dabei wird angenommen, dass die Abflüsse einer Gumbelverteilung folgen. Diese Hochwasserstatistik ergibt auch den Wert für QS_{Tg} .

Bei der *Niederschlagstatistik* wird ebenfalls angenommen, dass sich die Werte durch eine Gumbelverteilung beschreiben lassen. Dabei wird der Gebietsniederschlag *N*^{Geb} aus dem Stationsnie-

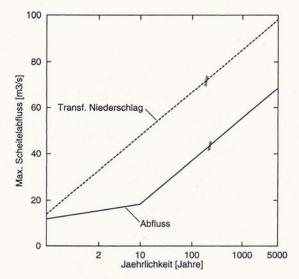


Abb. 2. Schematische Skizze der Hochwasserwahrscheinlichkeiten berechnet mit dem Gradex-Verfahren sowie transformierter Niederschlag (aufgetragen in Gumbel-Papier)

derschlag N durch Anwendung eines Flächenabminderungsfaktors ARF berechnet.

$$N^{\text{Geb}} = N \cdot \text{ARF}. \tag{3}$$

Die oben skizzierten Annahmen erlauben eine anschauliche graphische Interpretation (Abb. 2). Da der Niederschlag als gumbelverteilt angesehen wird, ist der gemäß Gln. (1), (2) und (3) transformierte Niederschlag auch gumbelverteilt und ergibt auf einem Gumbelpapier eine Gerade. Ebenso ist die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für Jährlichkeiten kleiner Tg auf einem Gumbelpapier wegen der gewählten Verteilung eine Gerade. Bei Erreichen der Sättigung (bei einer Jährlichkeit Tg = 10 Jahre in Abb. 2) besitzt die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve einen Knick, da für größere Jährlichkeiten der Niederschlag einbezogen wird. Die linearen Gln. (1), (2) und (3) ergeben nun, dass für Jährlichkeiten größer Tg die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve parallel Wahrscheinlichkeitskurve des Niederschlags ist.

2.2 Diskussion der Annahmen und Parameterwahl

Im Folgenden sollen kurz die Annahme des Gradex-Verfahrens in Hinblick auf österreichische Verhältnisse diskutiert werden sowie Hinweise für die Parameterwahl gegeben weden. Die Annahme einer Gumbelverteilung für den Abfluss ist im Mittel jedenfalls eine gute Näherung, da die Schiefe einer Gumbelverteilung von 1,14 etwa der mittleren Schiefe der Abflusskollektive in Österreich entspricht (Blöschl und Piock, 1998). Wenn der Wert von Tg nicht sehr groß ist, wird diese Annahme nur für kleine Jährlichkeiten (T < Tg) herangezogen, und in diesem Fall ist die Wahl der Verteilungsfunktion (bzw. die Wahl der Schiefe) nur von untergeordneter Bedeutung. Die Annahme einer Gumbelverteilung für den Niederschlag dürfte in Osterreich näherungsweise auch gut erfüllt sein. Untersuchungen auf Basis der Tageswerte (z. B. Seebacher und Shahin, 1985) zeigen etwa mittlere Schiefen von 1,4 für 151 Stationen in Osterreich. Allerdings wird im Falle des Niederschlags die Gumbelverteilung im Gradex-Verfahren auch zur Extrapolation auf große Jährlichkeiten herangezogen. Die Reihenlänge der Niederschläge auf Basis von Tageswerten sind zwar in Osterreich wesentlich länger als Reihen des Abflusses (100 Jahre im Vergleich zu etwa 30 Jahre beim Abfluss), doch bringt eine Extrapolation auf 1000, 5000 oder 10000 Jahre jedenfalls eine bedeutende Unsicherheit mit sich. Insbesondere stellt sich die Frage des Erreichens eines maximalen Wertes des Niederschlags (Probable Maximum Precipitation, PMP), das sich in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung als Abflachen der Kurve bei einer großen Jährlichkeit darstellen würde. Hier sei auf Untersuchungen zu Extremniederschlägen in Österreich verwiesen (Gutknecht und Watzinger, 1999; Nobilis et al., 1990).

Zur Ermittlung des Gebietsniederschlags wird im Gradex-Verfahren der Flächenabminderungsfaktor ARF verwendet, der auch in vielen anderen ingenieurhydrologischen Ansätzen Verwendung findet. Dazu gibt es in Österreich bereits einige Untersuchungen (siehe z. B. Gutknecht, 1982), die unter anderem die Bedeutung der Niederschlagsmechanismen auf den Flächenabminderungsfaktor betonen. Bei konvektiven Niederschlägen (entsprechend kurzer Niederschlagsdauer und hohen Intensitäten) nehmen die Flächenabminderungsfaktoren kleine Werte an (z. B. 0,5), während bei synoptischen Niederschlägen (entsprechend längerer Niederschlagsdauer und verhältnismäßig kleinen Intensitäten) die Flächenabminderungsfaktoren größer sind (z. B. 0,9). Manchmal wird auch ein Zusammenhang des Flächenabminderungsfaktors mit der Jährlichkeit gefunden (z. B. Sivapalan und Blöschl, 1998).

Weiters muss im Gradex-Verfahren die Bezugsdauer H gewählt werden. Viele ingenieurhydrologische Verfahren (wie z. B. das Flutplanverfahren) gehen davon aus, dass die maßgebende Niederschlagsdauer der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. Im Prinzip wäre deshalb auch im Gradex-Verfahren eine Bezugsdauer in der Größenordnung der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes wünschenswert, da anzunehmen ist, dass sich bei diesem Zeitintervall die Verteilungsfunktion des Niederschlags am besten in der Verteilungsfunktion des Abflusses widerspiegelt. Allerdings bietet sich aus Gründen der Datenverfügbarkeit eine Bezugsdauer von H = 1 Tag an, da Tageswerte des Niederschlags in Österreich für etwa 100 Jahre und 1000 Stationen vorliegen, während für kürzere Bezugsdauern die Reihen wesentlich kürzer sind und die Anzahl der Stationen wesentlich geringer ist (ungefähr 150 Stationen mit im Mittel 25 Jahren). Bei diesen Gegebenheiten dürfte deshalb eine Bezugsdauer von H = 1 Tag vorzuziehen sein.

Das Gradex-Verfahren geht davon aus, dass ab einer bestimmten Jährlichkeit Tg Sättigung auftritt. Für die Wahl von Tg empfehlen Duband et al. (1994) einen Wert von Tg = 10 Jahren. Da in Österreich wegen der unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten auch sehr unterschiedliche hydrologische Situationen in verschiedenen Einzugsgebieten auftreten, ist nicht zu erwarten, dass ein einziger Wert für Tg für alle Gebiete in Osterreich zutrifft. Insbesondere müsste in Gebieten, in denen Sättigung auch bei extremen Ereignissen nicht erreicht wird, ein wesentlich größerer Wert von Tg angenommen werden. Während eine Weiterentwicklung des Gradex-Verfahrens (das Agregee-Verfahren, Lang und Oberlin, 1994, das allerdings in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert wird) die Sättigung des Gebietes auf drei Bereiche (observable, progressive, asymptotic domains) erstreckt, löst das nicht das grundsätzliche Problem der Wahl dieser Bereiche bzw. des Schwellenwertes Tg.

Zuletzt wird der Parameter r etwas eingehender diskutiert, da er nicht Teil von vergleichbaren

ingenieurhydrologischen Ansätzen ist. Durch Umformen von Gl. (2) ergibt sich, dass der Parameter r als das Verhältnis zwischen dem Scheitelabfluss Qs und dem mittleren Abfluss Qm über die Dauer H definiert ist (Abb. 1):

$$r = \frac{QS}{Qm}. (4)$$

Der Parameter r gibt in summarischer Weise die Gebietsdynamik und die zeitliche Variabilität des Ereignisniederschlags wieder. Gebiete mit einer schnellen Abflussreaktion (d. h. kleinen Konzentrationszeit) haben eine schlanke Welle mit einem verhältnismäßig großen Scheitel und somit große r-Werte. Gebiete mit einer langsamen Abflussreaktion (d. h. große Konzentrationszeit) haben eine flache Welle mit einem verhältnismäßig kleinen Scheitel und somit kleine r-Werte. Der r-Wert ist somit eng mit der Konzentrationszeit tc des Gebiets verknüpft. Ebenso spiegelt sich eine zeitlich ausgeglichene Niederschlagsverteilung in einem kleinen r-Wert wider, zeitlich konzentrierte Niederschläge ergeben größere r-Werte. Die Ermittlung des r-Wertes kann durch Auswertung von beobachteten Hochwasserwellen erfolgen, indem der Quotient aus dem Scheitelabfluss und dem Mittelwert Qm des Abflusses über ein Zeitintervall H im Bereich des Scheitels gebildet wird (Gl. (4)). Abildung 3 zeigt als Beispiel Auswertungen an den Pegeln Wienerbruck und Mitterbach, wobei die Scheitelwerte Qs den Mittelwerten Qm gegenübergestellt wurden. Jeder Punkt entspricht einem Hochwasserereignis. Für Mitterbach sind die Scheitel Qs ungefähr gleich den Mittelwerten Qm und damit ist r ungefähr 1. Für Wienerbruck sind die Scheitel Qs deutlich größer als die Mittelwerte Qm. Die Werte für r liegen zwischen 1 und 2. Tendenziell liegen die größeren Abflussscheitel näher der Linie für r = 2. Das bedeutet, dass die Werte für r tendenziell mit dem Abfluss zunehmen. Als Vergleich wurde an beiden Pegeln die Konzentrationszeit tc für dieselben Ereignisse aufgetragen, die durch Eichung eines Niederschlag-Abflussmodells ermittelt wurden (Gutknecht et al., 1995). In Mitterbach sind die Konzentrationszeiten groß und dementsprechend ist r klein. In Wienerbruck hingegen sind die Konzentrationszeiten verhältnismäßig klein und dementsprechend ist r groß. Es zeigt sich hier auch eine unterschiedliche Gebietsdynamik. Während Mitterbach eine lineare Abflussreaktion zeigt (d. h. r-Wert und Konzentrationszeit tc sind nahezu unabhängig vom Abfluss), lässt das Gebiet Wienerbruck eine hohe Nichtlinearität im Abflussverhalten erkennen. Die Konzentrationszeit nimmt mit zunehmender Abflusshöhe ab und damit nimmt der r-Wert mit dem Abfluss zu. Das Gradex-Verfahren geht von der Annahme eines konstanten r-Wertes aus, der von der Jährlichkeit und damit vom Abfluss unabhängig ist. Es ist deshalb anzunehmen, dass das Verfahren bei Gebieten mit linearem Abflussverhalten bessere Ergebnisse liefert als bei Gebieten mit einer nichtlinearen Abflussdynamik. Das Agregee-Ver-

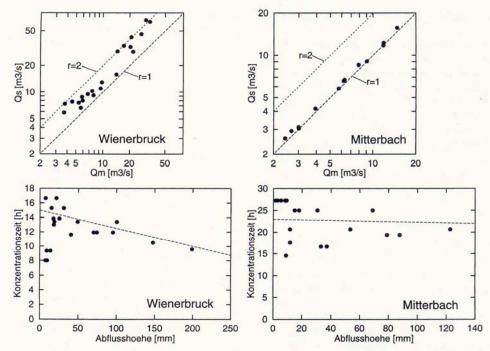


Abb. 3. Auswertung von Hochwasserwellen an den Pegeln Wienerbruck und Mitterbach. Die *r*-Werte ergeben sich als *Qs/Qm* (oben). Als Vergleich sind die für die selben Ereignisse durch Eichung eines Niederschlag-Abflussmodells ermittelten Konzentrationszeiten *tc* aufgetragen (unten)

fahren (Lang und Oberlin, 1994) ermöglicht es, eine Abhängigkeit des r-Wertes von der Jährlichkeit zu berücksichtigen, doch erfordert dies eine eingehende Analyse von Abflusswellen. Abschließend sei erwähnt, dass bei manchen Anwendungen des Gradex-Verfahrens regionale Werte für den r-Wert verwendet werden, die auch auf unbeobachtete Einzugsgebiete übertragen werden (Duband et al., 1994).

2.3 Rechenschritte und Anwendungsbeispiel

Im Folgenden soll an Hand des Pegeleinzugsgebiets Wienerbruck die Anwendung des Gradex-Verfahrens illustriert werden. Gegeben seien die folgenden Daten: Gebietsfläche $A=36,1~\mathrm{km^2}$; $r=2,8~\mathrm{aus}$ der Analyse beobachteter Hochwasserwellen für den Pegel Wienerbruck (siehe auch Abb. 3); Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag ARF = 0,8 aus einer Analyse der regionalen Niederschlagsverteilung bei einigen Hochwasserereignissen. Die Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags ($H=24~\mathrm{h}$) an der Station Lackenhof für die Jahre 1901–1992 ergeben eine Standardabweichung $\sigma_N=23,72~\mathrm{mm/Tag}$. Die Jahreshöchsthochwässer am Pegel Wienerbruck für die Jahre 1960–1993 ergeben einen Mittelwert von $\overline{x_Q}=21,91~\mathrm{m^3/s}$ und eine Standardabweichung von $\sigma_Q=14,48~\mathrm{m^3/s}$. Die Jährlichkeit bei Sättigung wird zu $Tg=10~\mathrm{Jahre}$ gewählt.

Die Anwendung des Gradex-Verfahrens erfordert nun die folgenden Rechenschritte: Der Gumbelparameter des transformierten Niederschlags ergibt sich zu

$$ap = \frac{\sigma_N \cdot ARF \cdot r \cdot A}{1,2825 \cdot H} \cdot \frac{1}{3.6},\tag{5}$$

ap wird auch als der "gradex" bezeichnet. Der letzte Term in Gl. (5) berücksichtigt die unterschiedlichen Einheiten der Größen dieser Gleichung. Bei der Gumbelverteilung wird hier zur klareren Darstellung auf eine Korrektur der Parameter zufolge kurzer Reihenlänge verzichtet. Der Abfluss bei einer Jährlichkeit Tg = 10 Jahre ergibt sich entsprechend einer Gumbelverteilung zu:

$$Q_{10} = \frac{(-\log(-\log(0.9)) \cdot \sigma_Q}{1.2825} + (\overline{x_Q} - 0.4501 \cdot \sigma_Q). (6)$$

Als Hilfswert wird Q_i benötigt:

$$Q_i = Q_{10} + ap \cdot \log(-\log(0.9)). \tag{7}$$

Für die Jährlichkeiten T kleiner gleich Tg = 10 Jahre ist damit der mit dem Gradex-Verfahren ermittelte Abfluss:

$$Q_T = \frac{-\log\left(-\log\left(1 - \frac{1}{T}\right) \cdot \sigma_Q}{1,2825} + (\overline{x_Q} - 0,4501 \cdot \sigma_Q). \quad (8)$$

Für Jährlichkeiten T größer Tg = 10 Jahre ist der mit dem Gradex-Verfahren ermittelte Abfluss:

$$Q_T = Q_i - ap \cdot \log\left(-\log\left((1 - \frac{1}{T})\right)\right). \tag{9}$$

Für das Beispiel Wienerbruck ergeben sich folgende Werte: $ap = 17.31 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{10} = 40.79 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_i = 1.83 \text{ m}^3/\text{s}$. Für eine Jährlichkeit von z. B.

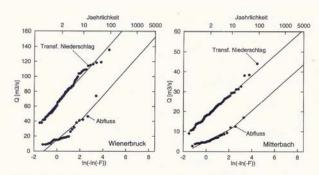


Abb. 4. Ergebnisse des Gradex-Verfahrens sowie transformierter Niederschlag und die daran angepasste Gumbelverteilung (aufgetragen in Gumbel-Papier) für die Pegel Wienerbruck und Mitterbach

T = 100 ist der mit dem Gradex-Verfahren ermittelte Abfluss: $Q_T = 81,53$ m³/s.

Abbildung 4 zeigt die mit dem Gradex-Verfahren berechnete Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für die Pegel Wienerbruck und Mitterbach sowie die empirischen Wahrscheinlichkeiten von Niederschlag und Abfluss und die an den Niederschlag angepasste Gumbelverteilung. Abbildung 4 lässt erkennen, dass in der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve bei einer Jährlichkeit von zehn Jahren ein Knickpunkt auftritt, der den Übergang vom durch den Abfluss bestimmten Verhalten zum durch den Niederschlag bestimmten Verhalten anzeigt. Bei diesen beiden Pegeln entsprechen die Ergebnisse nach dem Gradex-Verfahren ungefähr den Werten, die eine Verteilungsfunktion mit einer etwas größeren Schiefe als die Gumbelverteilung ergeben würde. Für die in Abb. 4 dargestellten Werte wurde die kurze Reihenlänge durch eine Korrektur der Parameter nach Gumbel berücksichtigt (Schreiber, 1970). Für eine Reihenlänge von 30 Jahren beispielsweise sind die Werte 1,2825 bzw. 0,4501 in den Gln. (6) und (8) durch die Werte 1,1124 bzw. 0.5362/1,1124 = 0.4829 zu ersetzen. Damit ergeben sich für das Beispiel Wienerbruck folgende Werte: $ap = 17,31 \text{ m}^3/\text{s};$ $Q_{10} = 44,23 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_i = 5,23 \text{ m}^3/\text{s}$. Für eine Jährlichkeit von z. B. T = 100 ist der mit dem Gradex-Verfahren ermittelte Abfluss: $Q_T = 84,96$ m³/s. Diese Werte stimmen mit denen in Abb. 4 überein.

3. Regionale Anwendung des Gradex-Verfahrens auf Österreich

3.1 Methode

Für eine Untersuchung zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich wurden Reihen der Jahreshochwässer ausgewertet. Die Kollektive wurden vorerst auf Datenfehler und anthropogene untersucht (Piock-Ellena Einflüsse Blöschl, 1998). Daraus ergaben sich 295 als unbeeinflusst anzusehende Pegel mit einer maximalen Reihenlänge von 1951-1994 und einer Einzugsgebietsfläche zwischen 10 und 5000 km². Weiters wurden maximale jährliche Tagesniederschläge mit einer maximalen Reihenlänge von 1901-1996 für 922 Stationen verwendet. Für alle Pegeleinzugsgebiete wurden die Gebietsgrenzen in digitaler Form erfasst. Abbildung 5 zeigt die Niederschlagsstationen, die Pegel und die Gebietsgrenzen.

Aus den maximalen jährlichen Tagesniederschlägen wurde vorerst für jede Station die Standardabweichung berechnet und auf ein feinmaschiges Raster räumlich interpoliert. Dies erfolgte mit Hilfe eines Kriging-Verfahrens. Das dem Kriging-Verfahren zu Grunde liegende Variogramm besaß folgende Parameter: $nugget = 5 (mm/Tag)^2;$ range = 20 km; sill = 125 (mm/Tag)2. Der nugget gibt nicht nur die kleinräumige Variabilität, sondern auch die Unsicherheit bei der Schätzung der Standardabweichung aus der Stichprobe wieder. Dadurch wird bei der Interpolation regionale Information aus den Nachbarstationen berücksichtigt (Blöschl und Piock, 1998). Da Tageswerte des Niederschlags verwendet wurden, ist H = 24 Stunden. Für den Flächenabminderungsfaktor wurde die Kurve I nach Hershfield (1968) angesetzt.

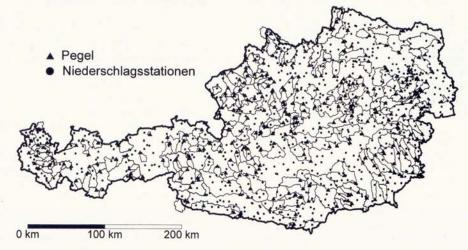


Abb. 5. Niederschlagsstationen (♠), Pegel (♠) und digitale Pegeleinzugsgebietsgrenzen in Österreich, die für die regionale Anwendung des Gradex-Verfahrens verwendet wurden

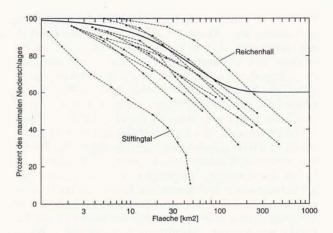


Abb. 6. Auswertungen des Flächenabminderungsfaktors für den Niederschlag für einige extreme Ereignisse in Österreich und Süddeutschland (----), (nach Gutknecht und Watzinger, 1999). — Kurve I nach Hershfield (1968)

Abbildung 6 zeigt diese Kurve sowie aus beobachteten Starkregenereignissen abgeleitete Flächenabminderungsfaktoren für kurze Extremereignisse, die Gutknecht und Watzinger (1999) entnommen wurden. Die Kurve I nach Hershfield zeigt im Vergleich zu den Starkregenereignissen verhältnismäßig große Werte und dürfte deshalb für das gewählte Zeitintervall H = 24 Stunden zutreffen. Tg wurde mit zehn Jahren angesetzt. Nun wurden drei Szenarien untersucht:

a) Auswertungen für Pegeleinzugsgebiete

Durch Verschneiden der Gebietsgrenzen mit den interpolierten Niederschlägen wurde eine mittlere Standardabweichung für jedes Pegeleinzugsgebiet ermittelt. Weiters wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Abflüsse für jedes Pegeleinzugsgebiet aus den Hochwasserkollektiven berechnet. Für eine erste Schätzung des r-Wertes wurde angenommen, dass sich die Hochwasserwellen für alle Gebiete durch folgende Beziehung beschreiben lassen, in der Q der Abfluss t die Zeit, C eine Konstante und tc die Speicherkonstante sind:

$$Q(t) = C \cdot (1 - e^{-t/tc}) \qquad t < tc,$$

$$Q(t) = Q(tc) \cdot e^{-\frac{t - tc}{tc}} \qquad t \ge tc.$$
(10)

Dies entspricht der Abflussreaktion eines Linearspeichers auf einen konstanten Niederschlag, dessen Dauer gleich der Speicherkonstante tc ist. Die Speicherkonstante entspricht ungefähr der Konzentrationszeit des Gebietes. Weiters wurde angenommen, dass die Konzentrationszeit tc (in Stunden) nur von der Gebietsfläche A (in km²) gemäß $tc = 2*A^{0.35}$ abhängt (Blöschl, 1996a). Der r-Wert wurde nun durch Integration der Abflusswelle von tc - H/2 bis tc + H/2 berechnet und ergab den folgenden Ausdruck:

$$r = \frac{Qs}{Qm} = \frac{(1 - e^{-1}) \cdot H}{tc \cdot \left(1 - (e - 1) \cdot e^{\frac{-H}{tc}}\right)}$$

$$r = \frac{Qs}{Qm} = \frac{(1 - e^{-1}) \cdot H}{\frac{H}{2} + tc \cdot \left(1 - e^{\frac{H/2 - tc}{tc}} - (1 - e^{-1}) \cdot e^{\frac{-H/2}{tc}}\right)}$$

Abbildung 7 zeigt den mit Gl. (11) für H=24 Stunden berechneten flächenabhängigen r-Wert, den Flächenabminderungsfaktor ARF nach Hershfield I, sowie das Produkt der beiden Parameter. Wie Gl. (5) erkennen lässt, ist nämlich das Produkt ARF*r die für das Gradex-Verfahren bestimmende Größe. Für große Gebiete um $10\,000~\rm km^2$ ergibt sich ein r-Wert von r=1,2. Für Gebiete um $100~\rm km^2$ liegt der r-Wert bei 2,0. Guillot (1972) gibt mittlere r-Werte von $1,2~\rm bis$ $1,6~\rm für Gebiete zwischen <math>100~\rm und$ $1000~\rm km^2$ an. Die aus Gl. (11) abgeleiteten Werte liegen also in der gleichen Größenordnung wie die Werte nach Guillot (1972).

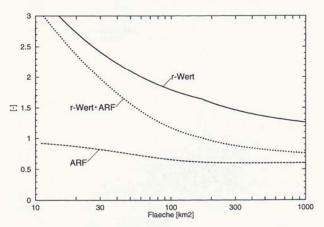


Abb. 7. — Aus der Konzentrationszeit nach Gl. (11) ermittelten r-Werte. ---- Flächenabminderungsfaktor (ARF) für den Niederschlag (Hershfield I), ----- Produkt von r-Wert und ARF, das als bestimmende Größe in das Gradex-Verfahren eingeht

b) Flächendeckende Auswertungen

In einem zweiten Szenario wurden die Auswertungen nicht für einzelne Pegeleinzugsgebiete, sondern flächendeckend für ganz Österreich vorgenommen. Der *r*-Wert wurde wie beim Szenario (a) ermittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit von Gebieten unterschiedlicher Größe wurden die Abflussspenden aller Gebiete auf 100 km² Gebietsgröße reduziert gemäß

$$Q_{\text{red}} = Q(A) \cdot \frac{\text{ARF}(100 \,\text{km}^2) \cdot r(100 \,\text{km}^2)}{\text{ARF}(A) \cdot r(A)}$$
 (12)

wobei $Q_{\rm red}$ die reduzierte Abflussspende für ein Gebiet von $100~{\rm km^2}$ und $Q({\rm A})$ die Abflussspende für ein Gebiet mit Fläche A ist. Diese Reduktion ist konsistent mit dem Gradex-Verfahren. Der Mittelwert und die Standardabweichung (beide ausgedrückt als reduzierte Abflussspende) für jeden Pegel wurden nun auf ein feinmaschiges Raster

räumlich interpoliert. Dies erfolgte mit Hilfe eines Kriging-Verfahrens mit den Variogrammparametern: nugget = 0,01 (m³/s/km²)²; range = 40 km; sill = 0,03 (m³/s/km²)² und nugget = 0,002 (m³/s/km²)²; range = 40 km; sill = 0,007 (m³/s/km²)². Für die Interpolation wurden nicht die Pegelkoordinaten, sondern die Koordinaten der Flächenschwerpunkte der Einzugsgebiete herangezogen. Das Gradex-Verfahren wurde nun für jeden Rasterpunkt angewendet. Damit ergibt sich für jeden Rasterpunkt ein Rechenwert für das *T*-jährliche Hochwasser, der einem hypothetischen Einzugsgebiet von 100 km² Fläche entspricht.

c) Auswertungen mit aus Wellen abgeleiteten r-Werten

Im dritten Szenario wurde sowohl eine einzugsgebietsbezogene Auswertung (wie in (a)) als auch eine rasterbezogene Auswertung (wie in (b)) durchgeführt. Der Unterschied zu den beiden vorhergehenden Szenarien besteht in der Wahl der *r*-

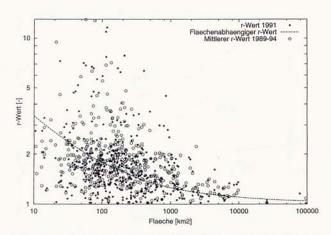


Abb. 8. r-Werte (•) berechnet als das Verhältnis zwischen dem maximalen jährlichen Hochwasserscheitel (Momentanwert) und dem mittleren Tagesabfluss an diesem Pegel zum gleichen Datum für alle Pegel Österreichs für das Jahr 1991 (•) und das geometrische Mittel der r-Werte für die Jahre 1989–1994 (o), aufgetragen gegen die Gebietsfläche. Große r-Werte entsprechen einer schnellen Abflussreaktion. ----- Aus der Konzentrationszeit ermittelte r-Werte nach Gl. (11)

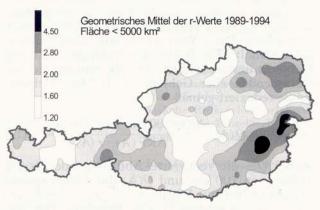


Abb. 9. Regionale Verteilung des mittleren *r*-Wertes für die Jahre 1989–1994 für Einzugsgebiete mit einer Fläche < 5000 km² ermittelt durch räumliche Interpolation der Werte aus Abb. 8

Werte. Um einen Anhaltspunkt über die räumliche Verteilung der r-Werte zu erhalten, wurden im dritten Szenario die r-Werte folgendermaßen bestimmt: Für ein Jahr (1991) wurde das Verhältnis zwischen dem maximalen jährlichen Hochwasserscheitel (Momentanwert) und dem mittleren Tagesabfluss an diesem Pegel zum gleichen Datum (bzw. am Folgetag) für alle Pegel gebildet. Dieses Verhältnis wurde als Surrogat für den r-Wert angesehen. Genau genommen müsste man die Hochwasserwelle kontinuierlich auswerten, doch erlaubte die gewählte Vorgangsweise eine rasche Abschätzung der r-Werte nur auf Basis der im Hydrographischen Jahrbuch veröffentlichten Daten. Die Vorgangsweise wurde für mehrere Jahre (1989 bis 1994) wiederholt. Abbildung 8 zeigt die r-Werte für 1991 sowie das geometrische Mittel aus den Jahren 1989 bis 1994 aufgetragen gegen die Einzugsgebietsfläche. Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die r-Werte tendenziell mit der Gebietsfläche abnehmen und mit der aus der Konzentrationszeit nach Gl. (11) ermittelten Linie im Mittel gut übereinstimmen. Es sei hier betont, dass die Linie in Abb. 8 nicht durch Anpassen einer Ausgleichskurve an die Werte in Abb. 8 ermittelt wurde, sondern durch einen unabhängigen Ansatz gemäß Gl. (11) berechnet wurde. Dies bedeutet, dass Gl. (11) im Mittel gut stimmen dürfte. Im Einzelfall können jedoch erhebliche Abweichungen auftreten. Diese Abweichungen können zu einer beträchtlichen Über- bzw. Unterschätzung des mit dem Gradex-Verfahren berechneten Hochwasserscheitels führen. Die r-Werte in Abb. 8 (Mittelwerte 1989 bis 1994) wurden in Abb. 9 für Gebiete mit einer Fläche kleiner 5000 km² regional dargestellt. Auffallend sind die sehr großen r-Werte im Osten Osterreichs und insbesondere in der Steiermark. Diese großen Werte dürften hauptsächlich auf die in diesen Gebieten hochwasserwirksamen Gewitterniederschläge und entsprechend schnellen Gebietsreaktionen zurückzuführen sein. Für die Anwendung des Gradex-Verfahrens im dritten Szenario wurden die r-Werte gemäß Abb. 8 verwendet, wobei für die flächendeckenden Auswertungen räumlich interpoliert wurde (Abb. 9).

3.2 Ergebnisse

a) Auswertungen für Pegeleinzugsgebiete

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,01 bzw. 0,0002 (entsprechend einer rechnerischen Jährlichkeit von 100 bzw. 5000 Jahren). Abbildung 10 oben zeigt die Extremwerte des Punktniederschlags unter Annahme einer Gumbelverteilung. Abbildung 10 Mitte zeigt die Abflussspenden, die mit Hilfe traditioneller Extremwertstatistik aus den beobachteten Hochwasserkollektiven unter der Annahme einer Gumbelverteilung berechnet wurden. Während die Abflussspenden für eine Jährlichkeit von 100 Jahren aus den Daten mit einer maximalen Beobachtungsdauer von 45 Jahren mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit ge-

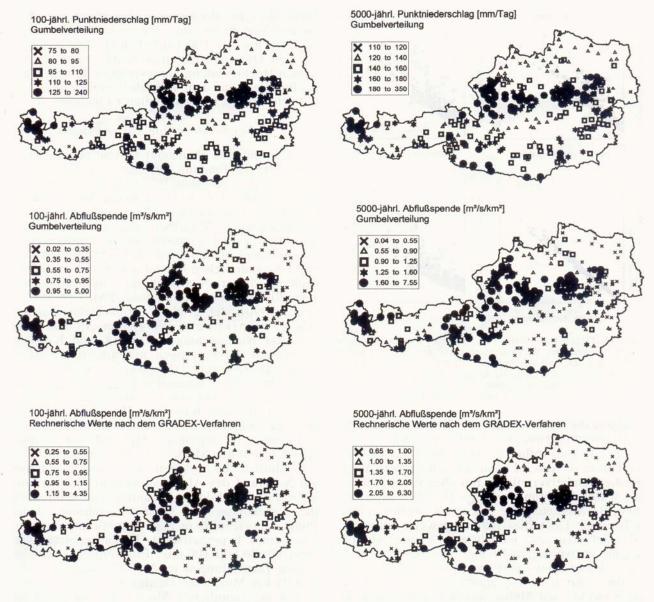


Abb. 10. Rechnerische Werte für den Punktniederschlag (aus einer Niederschlagsstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung, oben), für Abflussspenden (aus einer Hochwasserstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung, Mitte) sowie die mit dem Gradex-Verfahren ermittelten Abflussspenden (unten). Die Jährlichkeiten betragen 100 Jahre (links) bzw. 5000 Jahre (rechts)

schätzt werden können, dürften die Abflussspenden für eine Jährlichkeit von 5000 Jahren mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sein. Abbildung 10 unten zeigt schließlich die Ergebnisse des Gradex-Verfahrens unter Annahme eines flächenabhängigen r-Wertes nach Gl. (11). Einige quantitative Auswertungen der Ergebnisse in Abb. 10 sind in Abb. 11 dargestellt. Abbildung 11 oben zeigt eine Gegenüberstellung der Abflussspenden, berechnet mit dem Gradex-Verfahren, und den Abflussspenden, berechnet mit traditioneller Extremwertstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung. Es zeigt sich, dass für große Spenden das Gradex-Verfahren im Mittel ähnliche Werte wie die Gumbelverteilung liefert. Da die Gumbelverteilung mit der konstanten Schiefe von 1,14 für österreichische Verhältnisse im Mittel gut zutrifft (Blöschl und Piock, 1998), dürften die Gradex-Werte für große Abflussspenden nur kleine systematische Fehler aufweisen. Es zeigt sich jedoch eine große Streuung um die 1:1-Gerade. Das bedeutet, dass im Einzelfall die mit dem Gradex-Verfahren berechneten Abflüsse von den mit der Hochwasserstatistik berechneten Abflüssen erheblich abweichen können. Die Unterschiede betragen bei einer Jährlichkeit von 5000 Jahren bis zu 100 %. Fehler der Extremwertstatistik in dieser Größenordnung sind bei Verwendung von Daten mit einer maximalen Reihenlänge von nur 45 Jahren und einer Extrapolation auf eine Jährlichkeit von 5000 Jahren nicht überraschend. Insbesondere wenn man davon ausgeht, dass Extremereignisse durch den Niederschlag dominiert werden, ist anzunehmen, dass die Gradex-Werte zuverlässiger

300

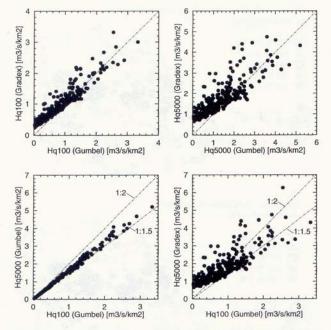


Abb. 11. Gegenüberstellung der mittels Gradex-Verfahren (unter Verwendung flächenabhängiger *r*-Werte) berechneten Abflussspenden und der mittels Hochwasserstatistik (unter Verwendung einer Gumbelverteilung) berechneten Abflussspenden für Pegeleinzugsgebiete in Österreich. Die Jährlichkeiten betragen 100 bzw. 5000 Jahre

sind und die Unterschiede vor allem auf Fehler der Extremwertstatistik zurückzuführen sind.

Für kleine Abflussspenden ergibt das Gradex-Verfahren in Abb. 11 systematisch größere Werte als die Gumbelverteilung. Bei allen Einzugsgebieten wurde Sättigung bei Tg = 10 Jahre angenommen. Bei Gebieten, die eine große Abflussspende aufweisen, kann dies näherungsweise zutreffen. Bei Gebieten, die jedoch eine kleine Abflussspende aufweisen, trifft dies jedenfalls nicht zu und führt zu einer signifikanten Überschätzung der Abflüsse durch das Gradex-Verfahren. Für die Gebiete mit kleinen Abflussspenden sind deshalb die Werte aus der traditionellen Hochwasserstatistik als deutlich zuverlässiger als die Werte nach dem Gradex-Verfahren anzusehen.

Abbildung 11 unten links zeigt die Gegenüberstellung des 5000-jährlichen Abflusses und des 100-jährlichen Abflusses jeweils berechnet mit Hilfe der Hochwasserstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung. Der 5000-jährliche Abfluss ist etwa das 1,5- bis 1,8fache des 100-jährlichen Abflusses. Allerdings dürfte dies ein rein rechnerisches Ergebnis sein, das auf die der Gumbelverteilung zugrundeliegende konstante Schiefe zurückzuführen ist. Ein konstantes Verhältnis von 1,5 bis 1,8 zwischen dem 5000- und dem 100-jährlichen Abfluss ist deshalb als unrealistisch anzusehen. Eine Gegenüberstellung des 5000-jährlichen Abflusses berechnet mit Hilfe des Gradex-Verfahrens und des 100-jährlichen Abflusses berechnet mit Hilfe der Hochwasserstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung (Abb. 11 rechts unten) zeigt eine große Streuung, die als viel zutreffender anzusehen ist. Demnach kann, je nach Gebiet, das

5000-jährliche Hochwasser (berechnet mit dem Gradex-Verfahren) einen Wert vom 1,3fachen bis zum 4fachen des 100-jährlichen Hochwassers annehmen. Dieser Vergleich zeigt, dass bei einer einfachen Hochrechnung von extremen Bemessungshochwässern aus dem 100-jährlichen Hochwasser mit sehr großen Unsicherheiten zu rechnen ist.

Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft

b) Flächendeckende Auswertungen

Abbildung 12 oben zeigt die interpolierten Extremwerte des Punktniederschlags unter Annahme einer Gumbelverteilung für die Jährlichkeiten von 100 und 5000 Jahren. Die größten Niederschläge treten in den Staulagen des Nordrandes des Alpenhauptkamms, in Vorarlberg sowie in Südkärnten auf. Die regionalen Muster für die Jährlichkeiten von 100 und 5000 Jahren sind sehr ähnlich. Sowohl die räumlichen Muster als auch die Größenordnung dieser Niederschläge sind mit unterschiedlichen Auswertungen des PMPs (Nobilis et al., 1990), der größten beobachteten Niederschläge (Gutknecht, 1994), der Modellierung extremer Niederschläge (Haiden und Kahlig, 1994) und Auswertungen mit unterschiedlichen Verteilungsfunktionen (Seebacher.und Shahin, 1985) in guter Übereinstimmung. Abbildung 12 Mitte zeigt die auf 100 km² bezogenen Abflussspenden, die auf Basis der Hochwasserstatistik unter der Annahme einer Gumbelverteilung ermittelt wurden. Die regionalen Muster dieser Abflussspenden sind den Mustern des Punktniederschlags sehr ähnlich. Die größten Abflussspenden treten am Nordrand des Alpenhauptkamms und in Vorarlberg auf. Abbildung 12 unten zeigt schließlich die Ergebnisse des Gradex-Verfahrens. Jeder Punkt repräsentiert in dieser Abbildung den Abfluss eines hypothetischen Einzugsgebietes von einer Größe von 100 km². Ein Vergleich der einzelnen Darstellungen in Abb. 12 zeigt, dass die räumlichen Muster der Gradex-Werte eine Kombination der räumlichen Muster der Niederschäge und der räumlichen Muster der aus der Hochwasserstatistik ermittelten Abflussspenden sind. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da der grundlegende Ansatz des Gradex-Verfahrens aus einer Kombination der Niederschlagsstatistik mit der Hochwasserstatistik besteht. Diese Kombination lässt sich am besten in den Gebieten erkennen, in denen die traditionelle Hochwasserstatistik und die Niederschlagsstatistik deutlich unterschiedliche Werte zeigen. Im östlichen Nordtirol beispielsweise zeigt die Niederschlagsstatistik verhältnismäßig kleine Werte, während die Hochwasserstatistik verhältnismäßig große Werte zeigt. Die Werte nach dem Gradex-Verfahren liegen dazwischen. Es ist auch zu erkennen, dass die räumlichen Muster der Gradex-Werte mit einer Jährlichkeit von 5000 Jahren mehr Ähnlichkeiten mit den räumlichen Mustern der Niederschläge aufweisen, während die räumlichen Muster der Gradex-Werte mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren mehr Ahnlichkeiten mit den räumlichen Mustern der Hochwasserstatistik aufweisen. Dies entspricht dem Gradex-Ansatz, der

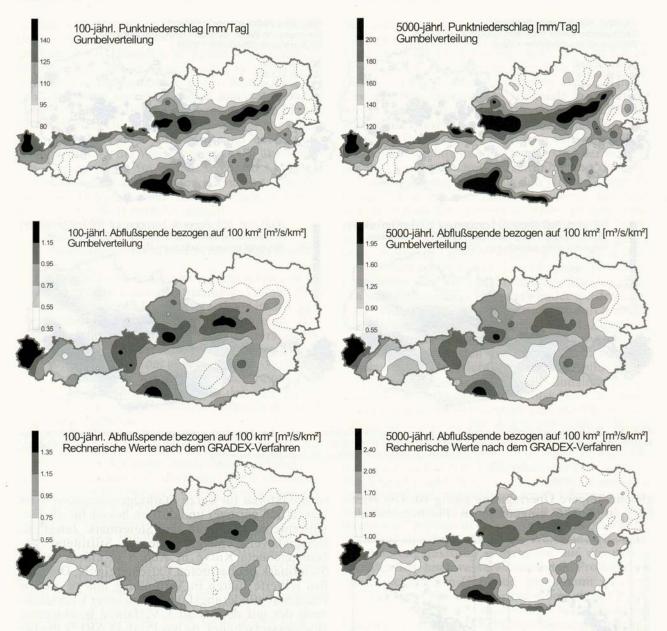


Abb. 12. Rechnerische Werte für den Punktniederschlag (aus einer Niederschlagsstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung, oben), für Abflussspenden bezogen auf 100 km² Gebietsfläche (aus einer Hochwasserstatistik unter Annahme einer Gumbelverteilung, Mitte) sowie die mit dem Gradex-Verfahren ermittelten Abflussspenden bezogen auf 100 km² Gebietsfläche (unten).

Die Jährlichkeiten betragen 100 Jahre (links) bzw. 5000 Jahre (rechts)

mit zunehmender Jährlichkeit einen zunehmend stärkeren Niederschlagseinfluss annimmt.

c) Auswertungen mit aus Wellen abgeleiteten r-Werten

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse des dritten Szenarios, das die *r*-Werte aus Abb. 9 verwendet. Abbildung 13 oben stellt die Einzugsgebietsauswertungen dar, während Abb. 13 unten die flächendeckenden Auswertungen mit der Reduktion auf 100 km² Einzugsgebietsfläche zeigt. Während im Westen ähnliche Muster wie in Abb. 10 bzw. Abb. 12 zu erkennen sind, ergeben sich im Osten Österreichs und insbesondere in der Steiermark

wesentlich größere Abflussspenden. Diese sind jedenfalls auf die großen r-Werte (Abb. 9) in diesen Gebieten zurückzuführen. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der großen Abflussspenden in der Steiermark lassen sich die folgenden Überlegungen anstellen: Die großen r-Werte dürften hauptsächlich auf die in diesen Gebieten hochwasserwirksamen Gewitterniederschläge und entsprechend schnellen Gebietsreaktionen zurückzuführen sein. Es ist anzunehmen, dass derart schnelle Reaktionen unter anderem auf eine teilweise Überregnung des Einzugsgebietes zurückzuführen sind. Für den Flächenabminderungsfaktor wurde allerdings die Kurve I nach Hershfield (1968) angesetzt (Abb. 6), die für längere Ereignisse und eine

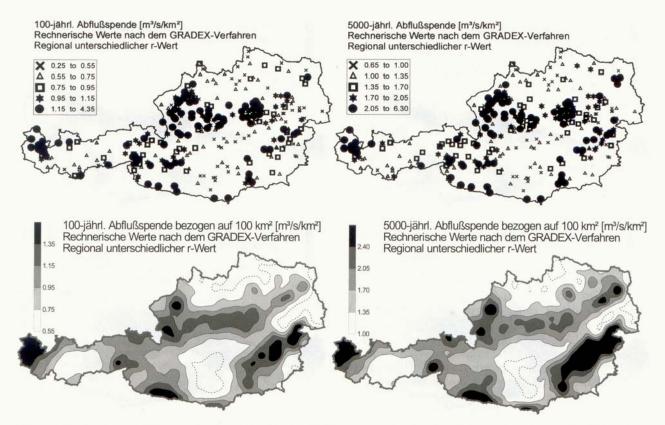


Abb. 13. Rechnerische Abflussspenden nach dem Gradex-Verfahren unter der Annahme eines regional unterschiedlichen (aus Wellen abgeleiteten) r-Wertes für eine Jährlichkeit von 100 (links) bzw. 5000 Jahren (rechts). In der unteren Darstellung sind die Abflussspenden auf 100 km² Gebietsfläche bezogen

gleichmäßigere Überregnung gültig ist. Die ebenfalls in Abb. 6 eingetragenen Flächenabminde-

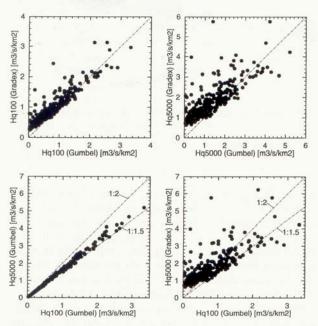


Abb. 14. Gegenüberstellung der mittels Gradex-Verfahren (unter Verwendung regional unterschiedlicher aus Wellen abgeleiteten r-Werte) berechneten Abflussspenden und der mittels Hochwasserstatistik (unter Verwendung einer Gumbelverteilung) berechneten Abflussspenden für Pegeleinzugsgebiete in Österreich. Die Jährlichkeiten betragen 100 bzw. 5000 Jahre

rungsfaktoren für kurze Starkregenereignisse sind wesentlich geringer und dürften besser für die Gewitterniederschläge in der Steiermark zutreffen. Beispielsweise entspricht die mit "Stiftingtal" gekennzeichnete Kurve in Abb. 6 in einem in der Steiermark beobachteten Extremereignis. Die großen r-Werte führen in Verbindung mit zu großen Flächenabminderungsfaktoren zu einer Überschätzung der mit dem Gradex-Verfahren berechneten Hochwasserscheitel, da das Produkt ARF*r die für das Gradex-Verfahren bestimmende Größe ist (Gl. (5)). Ein Vergleich mit Abb. 12 Mitte zeigt auch, dass sich die hohen Gradex-Abflussspenden in der Steiermark in der Hochwasserstatistik, die nur Abflussdaten verwendet, nicht andeuten. Es ist also insgesamt festzuhalten, dass eine Kombination großer r-Werte mit großen Flächenabminderungsfaktoren nicht als zutreffend anzusehen ist und deshalb die Ergebnisse im Abb. 13 jedenfalls weniger zuverlässig als die Ergebnisse in den Abb. 10 und 12 sind. Für eine genauere Untersuchung sollten regionale unterschiedliche r-Werte nur mit solchen Flächenabminderungsfaktoren kombiniert werden, die auf die gleichen Prozesse abgestimmt sind. Im Falle der Gewitterniederschläge bedeutet dies, dass die großen r-Werte nur mit entsprechend kleinen Flächenabminderungsfaktoren kombiniert werden dürfen.

Abbildung 14 zeigt schließlich den Vergleich der Gradex-Ergebnisse aus Abb. 13 (oben) mit den

Abflussspenden, die mit Hilfe der Extremwertstatistik (Abb. 10 Mitte) gewonnen wurde. Grundsätzlich ist ein ähnliches Verhalten wie in Abb. 11 zu erkennen. Das bedeutet, dass insgesamt betrachtet ein flächenabhängiger r-Wert (Abb. 11) ähnliche Werte wie ein regional unterschiedlicher r-Wert (Abb. 13) liefert. Bei großen Abflussspenden dürfte das Gradex-Verfahren wieder nur kleine systematische Fehler aufweisen und bei kleinen Abflussspenden die Werte systematisch überschätzen. Die Streuung im dritten Szenario (Abb. 13) ist etwas größer als im ersten Szenario (Abb. 11). Dies ist jedenfalls auf die räumlichen Unterschiede im r-Wert zurückzuführen.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Gradex-Verfahren ist ein einfaches und robustes Verfahren zur Bestimmung von Bemessungshochwässern. Der Ansatz des Gradex-Verfahrens besteht aus einer Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einer Hochwasserstatistik. Die für Österreich berechneten räumlichen Muster der Abflussspenden nach dem Gradex-Verfahren sind deshalb eine Kombination der räumlichen Muster der Niederschläge und der räumlichen Muster der aus einer Hochwasserstatistik ermittelten Abflussspenden.

Da das Gradex-Verfahren die Niederschlag-Abflussprozesse in vereinfachter Weise beschreibt, ist es für große Jährlichkeiten grundsätzlich besser geeignet als die traditionelle Hochwasserstatistik. Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse zeigt, dass in Gebieten mit großen Abflussspenden die Gradex-Werte im Mittel gut mit den Werten aus der Hochwasserstatistik übereinstimmen. Im Einzelfall treten jedoch Abweichungen von bis zu 100 % auf. Da das Gradex-Verfahren den Niederschlag einbezieht ist anzunehmen, dass die Abweichungen vor allem auf Fehler der Hochwasserstatistik zurückzuführen sind. Das Gradex-Verfahren dürfte deshalb für Gebiete mit großen Abflussspenden wesentlich genauere Werte als die Hochwasserstatistik liefern. In Gebieten mit kleinen Abflussspenden überschätzen die Gradex-Werte im Mittel die Werte aus der Hochwasserstatistik deutlich. Dies ist auf die Annahme der Sättigung bei einer Jährlichkeit von Tg = 10 Jahre zurückzuführen, die für diese Gebiete nicht zutreffen dürfte. Eine weitere Gegenüberstellung zeigt, dass, je nach Gebiet, das 5000-jährliche Hochwasser (berechnet mit dem Gradex-Verfahren) einen Wert vom 1,3fachen bis zum 4fachen des 100-jährlichen Hochwassers annehmen kann. Das bedeutet, dass bei einer einfachen Hochrechnung von extremen Bemessungshochwässern aus dem mit einer Hochwasserstatistik ermittelten 100-jährlichen Hochwasser mit sehr großen Unsicherheiten zu rechnen ist.

Wegen der einfachen Struktur und des verhältnismäßig geringen Datenbedarfs ist das Gradex-Verfahren für eine Anwendung in Österreich attraktiv. Dafür spricht nicht nur die vereinfachte Berücksichtigung der Niederschlag-Abflussprozesse, sondern auch das Einbeziehen von Tageswerten des Niederschlags, für die Reihen mit etwa 100 Jahren (im Vergleich zu Reihen mit nur etwa 30 Jahren im Fall des Abflusses) zur Verfügung stehen. Die in dieser Arbeit dargestellte regionale Anwendung berücksichtigt auch Information aus benachbarten Stationen. Diesen Vorteilen stehen allerdings die Schwierigkeiten bei der Parameterwahl gegenüber. Die beiden wichtigsten Parameter sind der r-Wert, der die Abflussdynamik beschreibt, und der Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag. In dieser Arbeit wurden einfache Annahmen für diese beiden Parameter getroffen. Dies erlaubt eine grobe Abschätzung der 100-jährlichen und 5000jährlichen Abflussspenden für ganz Österreich. Diese Werte sind jedoch für die Anwendung als Bemessungswerte nicht hinreichend genau. Bevor die Ergebnisse des Gradex-Verfahrens als Abschätzung für Bemessungswerte verwendet werden können, sind zusätzliche Auswertungen durchzuführen. Dies betrifft zum einen den r-Wert. Zuverlässige r-Werte könnte man aus einer Analyse beobachteter Abflusswellen gewinnen. Dabei ist auch gegebenenfalls die Nichtlinearität der Abflussreaktion zu berücksichtigen, d. h. die Zunahme des r-Werts mit dem Hochwasserabfluss bzw. der Jährlichkeit. Zum anderen betrifft dies die Flächenabminderungsfaktoren für den Niederschlag. Werte dafür sind aus einer Analyse der räumlichen Niederschlagsstruktur zu gewinnen. Während dazu bereits eine Reihe von Fallstudien vorliegen (z. B. Gutknecht und Watzinger, 1999), wäre eine flächendeckende Ermittlung der Flächenabminderungsfaktoren für ganz Österreich notwendig. Wie im dritten Szenario in dieser Arbeit gezeigt wurde, ist darauf zu achten, dass die r-Werte und Flächenabminderungsfaktoren gemeinsam auf die unterschiedlichen hochwasserauslösenden Prozesse in den verschiedenen Gebieten abgestimmt werden. Werden diese Prozesse nur bei einem dieser Parameter (in diesem Fall der r-Wert) berücksichtigt, kann dies zu massiven Fehleinschätzungen bei Anwendung des Gradex-Verfahrens führen. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich das Problem der Parameterwahl auch bei anderen vergleichbaren Modellen stellt. Wenn r-Werte und Flächenabminderungsfaktoren aus Daten flächendeckend abgeleitet werden, so sind diese Informationen auch für andere Modelle verwendbar.

Es ist auch die Modellstruktur des Gradex-Verfahrens zu diskutieren. Die Grundannahme des Gradex-Verfahrens ist, dass bei einer Jährlichkeit Tg und darüber das Gebiet als gesättigt angesehen werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass dies zwar für manche Gebiete in Österreich zutreffen dürfte, für andere Gebiete aber sicher nicht der Fall ist. Das bedeutet, dass für eine genauere regionale Beschreibung seltener Hochwässer ein Modell mit einer verfeinerten Modellstruktur zu verwenden ist. Solche detaillierteren Modelle der abgeleiteten Hochwasserstatistik stehen in der Literatur zur Verfügung (siehe z. B.

Blöschl und Sivapalan, 1997), müssten aber auf österreichische Verhältnisse abgestimmt werden. Die Anwendung des Gradex-Verfahrens in dieser Arbeit liefert wertvolle Hinweise für die Parameterwahl bei diesen verfeinerten Modellen der abgeleiteten Hochwasserstatistik, etwa in Hinblick auf die Annahme der Sättigung und die Bedeutung der Nichtlinearitäten im Abflussverhalten. Ein weiterer Vorteil solcher detaillierter Modelle ist. dass sie statt des empirischen Ansatzes des Gradex-Verfahrens (Gl. (1)) eine theoretisch besser abgesicherte Struktur besitzen. Weiters ist es damit möglich, geänderte Bedingungen bei den Niederschlag-Abflussprozessen weitergehend nachzubilden, als dies im Gradex-Verfahren möglich ist. Genau genommen bildet das Gradex-Verfahren nur den Übergang von teilweise gesättigtem zum gesättigten Gebietsverhalten (als Teil der Abflussbildung) nach. Hier bieten die detaillierten Modelle wesentlich mehr Möglichkeiten, etwa das Verhalten extremer Niederschläge (PMP) zu berücksichtigen und das saisonal unterschiedliche Wirksamwerden abflussrelevanter Prozesse nachzubilden. Dies ist besonders in Österreich wichtig (Piock et al., 1999; Merz et al., 1999).

Abschließend ist festzuhalten, dass die Anwendung des Gradex-Verfahrens mit dem derzeitigen Wissensstand für österreichische Verhältnisse zwar aus verschiedenen Gründen attraktiv ist und der traditionellen Hochwasserstatistik vorzuziehen ist, die damit ermittelten Hochwasserabflüsse aber nur grobe Schätzwerte darstellen. Für eine quantitative Anwendung zur Bestimmung von Bemessungsabflüssen müssten die Parameter des Gradex-Verfahrens (insbesondere der r-Wert und der Flächenabminderungsfaktor) durch zusätzliche Auswertungen genauer bestimmt werden. Auch eine Verbesserung der Modellstruktur in Richtung eines umfassenderen Modells der abgeleiteten Hochwasserstatistik ist wünschenswert, um damit die Struktur des Hochwasserverhaltens in Osterreich auf regionaler Basis besser wiedergeben zu können.

Danksagung

Für finanzielle Unterstützung wird dem Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (Projekt Nr. M00298-TEC), der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Projekt Nr. HOE 12/97 und HOE 18/99) und der European Commission DG XII (Projekt Nr. ENV4-CT97-0529) gedankt. Weiters wird dem Hydrographischen Zentralbüro für die Bereitstellung der hydrologischen Basisdaten gedankt. Die Autoren sind O. Univ.-Prof. Dr. Gutknecht für wertvolle Hinweise zu diesen Arbeiten zu Dank verpflichtet.

Literatur

Blöschl, G. (1996a): Scale and scaling in hydrology. Wiener Mitt. 132, Habilitationsschrift, Technische Universität Wien.

Blöschl, G. (1996b): Prozessnahe Niederschlag-Abflussmodellierung. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 48 (5/6), 156–165.

Blöschl, G., Piock-Ellena, U. (1998): Abflusstypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Zwischenbericht 1997, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-12/97), Institut für Hydraulik, TU Wien.

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

Blöschl, G., Sivapalan, M. (1997b): Generating mechanisms of floods – implications for flood frequency. Annales Geophysicae [Suppl. II] 15, European Geophysical Society, C318.

Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Merz, R., Gutknecht, D. (1999): Prozessorientierte Regionalisierung von Hochwässern. In: Tagungsband zum Kolloquium "Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete", Kaiserslautern, 4.–5. März 1999. Schriftenr. Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kaiserslautern.

Duband, D., Michel, C., Garros, H., Astier, J. (1994): Design flood determination by the Gradex method, CIGB, ICOLD, Paris.

DVWK (1979). Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft H. 101, 2. bearb. Aufl., Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Paul Parey, Hamburg.

DVWK (1998): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Entwurf Mai 1998. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK).

Eagleson, P. S. (1972): Dynamics of flood frequency. Water Resour. Res. 8, 878–898.

Guillot, P. (1972): Application of the Method of Gradex. In: Schulz, E. F., Koelzer, V. A., Mahmood, K. (eds.), Floods and droughts. Proc. Second Int. Symposium in Hydrology, Fort Collins, Co, USA, Water Resources Publications, 44–49.

Guillot, P. (1993): The arguments of the Gradex method: a logical support to assess extreme floods. In: Kundzewicz, Z. W., Rosbjerg, D., Simonovic, S. P., Takeuchi, K., (eds.), Extreme hydrological events: precipitation, floods and droughts. Proc. Yokohama Symposium, July 1993, IAHS Publ. No. 213, 287–298.

Gutknecht, D. (1982): Zur Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Niederschlägen anhand von Standardbeobachtungsdaten. Mitt. Hydrographischer Dienst Österreich Nr. 50, Wien, 1–26.

Gutknecht, D. (1994): Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 46 (3/4), 50-57.

Gutknecht, D., Watzinger, A. (1999): Untersuchung zur Erfassung und quantitativen Abschätzung von abflussrelevanten Faktoren bei der Ermittlung von Katastrophen-Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten. Techn. Bericht. Inst. f. Hydraulik, Technische Universität Wien.

Gutknecht, D., Blöschl, G., Watzinger, A. (1995): Ermittlung eines Bemessungshochwassers für die Sperre Erlaufklause, Techn. Bericht, Inst. f. Hydraulik, Technische Universität Wien.

Haiden, T., Kahlig, P. (1994): Modellierung extremer Niederschläge. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 46 (3/4), 57–65.

Hershfield, D. M. (1968): Rainfall inputs for hydrological models. Proc., Bern Symposium IUGG No. 78, 177–188.

Kirnbauer, R. (1981): Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau. Wiener Mitt. Wasser – Abwasser – Gewässer 42, Technische Universität Wien.

Klemeš, V. (1993): Probability of extreme hydrometeorological events – a different approach. In: Kundzewicz, Z. W., Rosbjerg, D., Simonovic, S. P., Takeuchi, K., (eds.), Extreme hydrological events: precipitation, floods and droughts. Proc., Yokohama Symposium, July 1993, IAHS Publ. No. 213, 167–176.

Lang, M., Oberlin, G. (1994): Preliminary test for mapping the 100-year flood with the AGREGEE Model. In: FRIEND: flow regimes from international experimental and network data. Proc., Braunschweig Conference, October 1993, IAHS Publ. No. 221, 275–284.

Merz, R., Piock-Ellena, U., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1999): Seasonality of flood processes in Austria. IAHS Publ. no. 255, 273-278.

Nobilis, F., Haiden, T., Kerschbaum, M. (1990): Statistische Untersuchungen zur Frage des vermutlich größten Niederschlags (PMP) in Österreich. Mitt. Hydrographischer Dienst Österreich Nr. 63, Wien, 27-66.

Piock-Ellena, U., Blöschl, G. (1998): Abflusstypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Zwischenbericht 1998, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-12/97), Institut für Hydraulik, TU Wien.

Piock-Ellena, U., Merz, R., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1999): On the regionalisation of flood frequencies - Catchment similarity based on seasonality measures. XXVIII IAHR Proc., CD-Rom: 434.htm.

Rosso, R. (ed.) (1999): Flash-flood risk assessment under the impacts of land use changes and river engineering works. Annual Report to the European Community DG XVV, 1998. Politecnico di Milano, Mailand. Schreiber, H. (1970): Über Methoden zur Berechnung der n-Jährlichkeit von Hochwässern. Österr. Wasserwirtschaft 22, 138–153.

Seebacher, F. S., Shahin, M. M. A. (1985): Beitrag zur statistischen Auswertung extremer Tagesniederschläge in Österreich. Österr. Wasserwirtschaft 37, 181–190.

Sivapalan, M., Blöschl, G. (1998): Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity-duration-frequency curves. J. Hydrol. 204, 150–167.

Tavakkoli, D. (1985): Simulation von Hochwasserwellen aus Niederschlägen. Dissertation, Institut f. Hydraulik, Technische Universität Wien.

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Ing. Ralf Merz, A. o. Univ.-Prof. Dr. Günter Blöschl und Mag. Ulrike Piock-Ellena, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/223, A-1040 Wien.