

FLÄCHENDECKENDE BESTIMMUNG VON NIEDERWASSER-KENNGRÖSSEN IN ÖSTERREICH

Gregor Laaha und Günter Blöschl

1. Einleitung

Die Bestimmung charakteristischer Niederwasserabflüsse ist eine wichtige Grundlage für viele wasserwirtschaftliche Aufgaben, wie die Beurteilung der Auswirkung von Wasserentnahmen und Einleitungen auf das Abflussregime (Tallaksen and van Lanen, 2004), die Beurteilung möglicher Standorte von Abwasserreinigungsanlagen und Abwassereinleitungen auf die Wasserqualität (Kroiß et al., 1996), die Ermittlung von Restwassermengen für Wasserkraftwerke (Gustard et al., 2004), sowie die Beurteilung von Flusshabitaten in einem gewässerökologischen Kontext (Jungwirth et al., 2003). Einige Länder entwickelten deshalb Verfahren zur flächendeckenden Bestimmung von Niederwasserkennwerten.

Großbritannien verfügt über eine lange Geschichte in Bezug auf nationale Schätzverfahren. In der ersten Phase wurde der Low Flow Studies Report durchgeführt, der eine erste generelle Studie über die Abhängigkeit des Niederwasserregimes von physiographischen und klimatischen Einzugsgebietskenngrößen ist (Institute of Hydrology, 1980). In der zweiten Phase (Gustard et al., 1992) wurde ein globales multiples Regressionsmodell zwischen standardisierten Niederwasserkennwerten, wie z.B. Q_{95}/MQ , und dem Bodentyp basierend auf die "Hydrology of Soil Types (HOST)" Klassifikation (Boorman et al. 1995) erstellt, und bis in die frühen 1990er Jahre operationell angewendet. Das globale Modell neigte zur systematischen Unterschätzung bei hohen Werten der standardisierten Niederwasserkenngröße (Holmes et al., 2002). In einer dritten Phase wurde daher versucht, mittels gepoolter Regionalisierungsstrategie ein verbessertes Modell zu erstellen. Dieses gepoolte Modell wurde im Software Paket Low Flows 2000 (Young et al., 2003) implementiert, und wird derzeit als Verfahren für die Regionalisierung von Niederwasserkenngrößen verwendet.

Andere Länder verfolgen alternative Verfahren. Die Schweiz entwickelte ein regionales multiples Regressionsmodell zwischen Niederwasserspende q_{95} und Einzugsgebietskenngrößen (Aschwanden und Kan, 1999a), basierend auf Regionen, die mittels Residuenmusteranalyse (Hayes, 1992) ermittelt wurden. Eine Karte, welche gemessene und regionalisierte Niederwasserkennwerte an Gewässerstellen beinhaltet, wurde im Hydrologischen Atlas der Schweiz publiziert (Aschwanden und Kan, 1999b). Norwegen vergleicht gegenwärtig unterschiedliche Regionalisierungsmöglichkeiten im Rahmen eines Pilotprojekts für ein nationales Schätzverfahren, und erste Resultate zeigen, dass ein multiples Regressionsmodell geringere Fehler als ein konzeptionelles Einzugsgebietsmodell aufweist (Engeland et al., 2006). In den USA wurden multiple Regressionsmodelle für die einzelnen Staaten entwickelt (Jennings et al., 1994), welche gegenwärtig in einer GIS-basierten Software implementiert werden (Ries, 2002). In Neuseeland wurde ein konzeptionelles Modell für Abflussauslauf-

linien entwickelt, dessen Parameter durch lokale Kalibrierung und Regionalisierung für 92 homogene Regionen ermittelt wurden. An der Implementierung des Modells als nationales Verfahren wird gearbeitet (Henderson et al., 2004).

Obwohl in fast allen Ländern ein Regressionsansatz Verwendung findet, gibt es große Unterschiede in den übrigen Aspekten des Regionalisierungsverfahrens. Österreich verfügt bislang über kein flächendeckendes Verfahren für beobachtete und unbeobachtete Gebiete. In diesem Beitrag wird ein derartiges Verfahren präsentiert. Das Verfahren verwendet Ansätze, die sich bei Methodenvergleichen als für die österreichischen Gegebenheiten am genauesten erwiesen haben.

2. Hydrologische Situation und Daten

2.1 Untersuchungsgebiet und regionale Niederwasserprozesse

Österreich ist hydrologisch gesehen äußerst heterogen. Diese Heterogenität spiegelt sich in einer Vielfalt in Bezug auf Größe und jahreszeitliches Auftreten von Niederwässern wider (Laaha and Blöschl, 2006b). Im Flach- und Hügelland im Osten treten Niederwasser primär im Sommer infolge einer negativen klimatischen Wasserbilanz auf. In den Alpen treten Niederwässer überwiegend im Winter auf, und werden durch Gefrierprozesse gesteuert. Die Niederschlagsmenge hat einen sehr großen Einfluss auf die Größe der Niederwasserdurchflüsse. In Österreich variiert der mittlere Jahresniederschlag zwischen ca. 500 mm im Osten und ca. 2800 mm im Westen. Die potentielle Evaporation zeigt ein entgegengesetztes Muster, und variiert von ca. 730 mm pro Jahr bis ca. 200 mm pro Jahr. Auch Geologie und Bodenarten zeigen eine große Vielfalt, wie z.B. Kristallin, Kalk und Flysch in den Alpen, Quartäre Füllungen in den Alpentälern, und tertiäre und quartäre Formationen im Flachland und Beckenlagen. Abhängig von den geologischen Bedingungen entstanden im Fels Kluftaquifere und in den Sedimenten Porenaquifere. Die Überlagerung all dieser Einflüsse bewirkt eine enorme räumliche Komplexität von Niederwässern in Österreich.

2.2 Abflussdaten, Disaggregation und Auswahl der Einzugsgebiete

Die Datengrundlage für die Niederwasseranalysen bilden Zeitreihen der Abflusstagesmittel von 603 Pegel des Hydrographischen Dienstes. Das sind alle Pegel die innerhalb des Bezugszeitraumes von 1977 bis 1996 mindestens 5 Jahre durchgehend gemessen wurden, und deren Einzugs- bzw. Zwischeneinzugsgebiete ein weitgehend natürliches Niederwasserregime aufweisen (Laaha und Blöschl, 2003). Einzugsgebiete mit Oberliegerpegeln wurden in Pegelzwischeneinzugsgebiete disaggregiert. Dadurch wird die Regionalisierung für kleine Gebiete erleichtert, und die räumliche statistische Abhängigkeit der Niederwasserdaten reduziert, wenngleich die Fehler der disaggregierten Niederwasserdaten etwas größer sind. Zwei Niederwasserdatensätze wurden bei der Regionalisierung verwendet. Der erste Datensatz besteht aus 325 Pegelzwischeneinzugsgebieten für die während der Bezugsperiode 1977-1996 durchgehende Abflussreihen vorliegen. Der zweite

Datensatz besteht aus 481 Pegelzwischen-einzugsgebieten für die mindestens 5 Jahre durchgehende Abflussreihen innerhalb der Bezugsperiode vorliegen. Mit diesem Datensatz werden ca. 60% der Fläche Österreichs abgedeckt.

2.3 Niederwasserkennwert

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Niederwasserschätzung bezieht sich auf den Niederwasserkennwert Q_{95} [$\Pr(Q > Q_{95}) = 0.95$]. Der Kennwert Q_{95} entspricht dem Durchfluss, der an 95% aller Tage der Bezugsperiode 1977 - 1996 an einem Pegel erreicht oder überschritten wurde, und nur an 5% aller Tage unterschritten wurde. Dieser Kennwert wurde wegen seiner Relevanz für eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Fragestellungen gewählt (siehe z.B. Kresser et al., 1985; Gustard et al., 1992; Smakhtin, 2001). In Österreich besteht zudem eine enge Beziehung zwischen Q_{95} und dem manchmal verwendeten mittleren Jahresniederwasser $MjNQ$, wenngleich Q_{95} robuster gegen Ausreißer (z.B. Fehler einzelner mittlerer Tagesabflüsse) ist (Laaha et al., 2005). Für Pegel ohne Oberliegerpegel wurde Q_{95} direkt aus der Zeitreihe der Abflusstagesmittel berechnet. Für Pegel mit Oberliegerpegel wurde Q_{95} des Einzugsgebiets durch Subtraktion der Q_{95} Werte der beiden Pegel berechnet. Diese Berechnung ist robuster als das Quantil der Differenzengangleinie beider Pegel, unter der Annahme der Synchronität der Niederwasserereignisse benachbarter Pegel. Alle Q_{95} Niederwasserkennwerte wurden mit der (Zwischen-)einzugsgebietsfläche normiert, und die resultierende Niederwasserspense q_{95} ($\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) wurde in allen weiteren Analysen verwendet. Abb. 1 zeigt die ermittelten Niederwasserspense in Österreich. Die größten Werte treten in Gebieten mit hohem Jahresniederschlag auf mit typischen Werten zwischen 6 und 20 $\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$. Die kleinsten Werte treten im Osten auf mit typischen Werten zwischen 0 und 8 $\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$.

2.4 Gebietskenngrößen

Für die Regionalisierung wurden 31 Gebietskenngrößen der Pegelzwischen-einzugsgebiete verwendet. Diese beziehen sich auf die Fläche des (Zwischen-)einzugsgebiets (A [10^1 km^2]), die topographische Höhe (H), die topographische Neigung (S), den Niederschlag (P), die Geologie (G), die Landnutzung (L), und die Gewässernetzdichte (D [10^2 m/km^2]). Die topographische Höhe des (Zwischen-)einzugsgebiets wird durch die Seehöhe des Pegels (H_0 [10^2 m]), die maximale Seehöhe (H_+ [10^2 m]), die Höhendifferenz (H_R [10^2 m]) und die mittlere Seehöhe (H_M [10^2 m]) beschrieben.

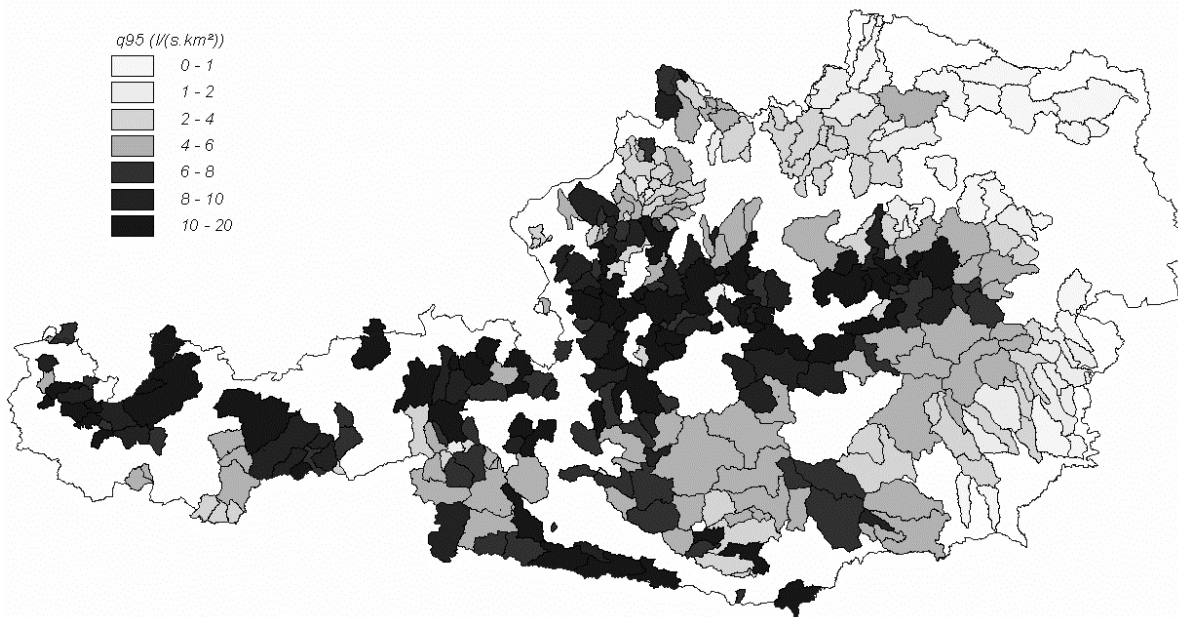


Abb. 1: Niederwasserspende q_{95} ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) aus Abflussdaten von 325 Zwischeneinzugsgebieten in Österreich. Alpine Einzugsgebiete zeigen höhere Werte und eine größere Variabilität.

Die Topographische Neigung (S) wird beschrieben durch die mittlere Neigung (S_M [%]), und durch den Flächenanteil der Neigungsklassen geringe Neigung (S_{SL} [%]), moderate Neigung (S_{MO} [%]), und steile Neigung (S_{ST} [%]). Der Niederschlag (P) wird beschrieben durch den mittleren Jahresniederschlag (P [10^2 mm]), den mittleren Sommerniederschlag (P_S [10^2 mm]), und den mittleren Winterniederschlag (P_W [10^2 mm]). Die Geologie (G) wird beschrieben durch den Flächenanteil der Einheiten Böhmisches Massiv (G_B [%]), Quartäre Sedimente (G_Q [%]), Tertiäre Sedimente (G_T [%]), Flysch (G_F [%]), Kalk (G_L [%]), Kristallin (G_C [%]), Aquifere mit hoch liegendem Grundwasserspiegel (G_{GS} [%]), Aquifere mit tief liegendem Grundwasserspiegel (G_{GD} [%]), und Quellregion (G_{SO} [%]). Die Landnutzung (L) wird beschrieben durch den Flächenanteil der Landnutzungsklassen Urban (L_U [%]), Ackerland (L_A [%]), Dauerkultur (L_C [%]), Weideland (L_G [%]), Wald (L_F [%]), Ödland (Fels) (L_R [%]), Feuchtgebiet (L_{WE} [%]), Wasserflächen (L_{WA} [%]), und Gletscher (L_{GL} [%]). Alle Kenngrößen wurden zunächst in ein regelmäßiges Raster umgewandelt, und dann mit den Gebietspolygonen verschnitten, um Kenngrößen für jedes (Zwischen-)einzugsgebiet zu ermitteln (Laaha and Blöschl, 2006b).

3. Generelle Vorgangsweise

Um eine möglichst genaue Schätzung zu erzielen, werden im dargestellten Verfahren niederwasserrelevante Informationen je nach Datenlage in unterschiedlicher Weise kombiniert. Dafür wurden alternative Ansätze mittels Kreuzvalidierung verglichen, um das für Österreich am besten geeignete Verfahren zu finden. Bei der Kreuzvalidierung wird für einen Pegel die Niederwasserkenngröße nur aus regionaler Information berechnet und dann mit den Messungen am Pegel verglichen. Deshalb erlaubt sie eine gute Aussage über die Genauigkeit der Regionalisierungsverfahren für Gebiete ohne

Abflussdaten (Efron and Tibshirani, 1993). Hinsichtlich Datenverfügbarkeit können drei Fälle unterschieden werden: (a) Einzugsgebiete mit langen Abflusszeitreihen (von 1977 bis 1996). Hier ist die Genauigkeit der ermittelten Niederwasserkennwerte am größten, und die Ungenauigkeit resultiert primär aus den Messfehlern der Abflüsse. (b) Einzugsgebiete mit kurzen Abflusszeitreihen. Hier hängt die Genauigkeit der Niederwasserkennwerte von der Länge der Abflusszeitreihe ab, und ein zeitlicher Abgleich ist nötig, um die Vergleichbarkeit mit den langjährigen mittleren Kennwerten herzustellen. (c) Einzugsgebiete ohne Abflussmessung. Für diese Gebiete ist ein Regionalisierungsansatz nötig, um den Niederwasserkennwert in Abhängigkeit von relevanten Einzugsgebietskennwerten zu schätzen. Zusätzlich ist ein Verfahren zur Gruppierung von Gebieten mit ähnlichem hydrologischen Verhalten bei Niederwasser erforderlich. Die Schätzungen für die drei Einzugsgebietsfälle werden schließlich durch eine räumliche Abgleichmethode kombiniert, welche der räumlichen Struktur der Einzugsgebiete Rechnung trägt. Das Schema der generellen Schätzstrategie ist in Abb. 2 wiedergegeben.

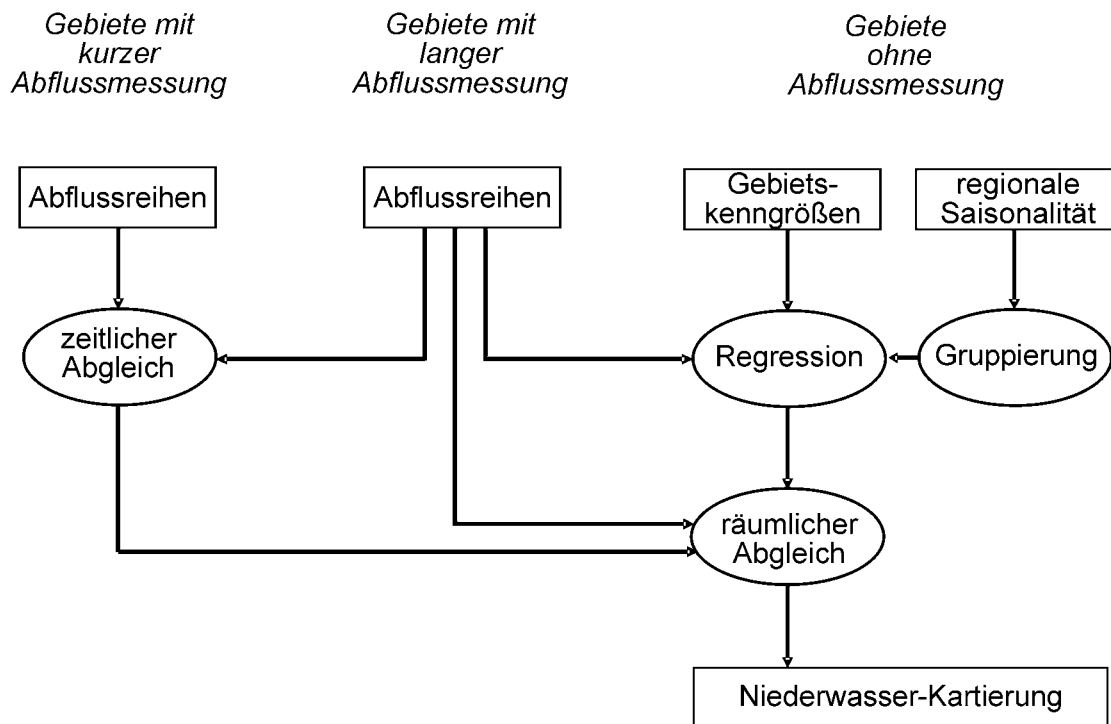


Abb. 2: Strategie der Niederwasserschätzung in Österreich, eine Kombination von Methoden für Gebiete mit kurzen Abflussreihen, langen Abflussreihen und ohne Abflussreihen, d.h. unbeobachtete Gebiete.

4. Beobachtete Gebiete

4.1 Beobachtungszeitraum

Zur Beurteilung des Niederwasserregimes werden primär solche Kennwerte herangezogen, die das langfristige, mittlere Verhalten von Niederwässern repräsentieren. Wegen der Variabilität klimatischer und anderer Einflüsse auf das

Abflussregime weichen Niederwasserkennwerte kurzer Abflussreihen von den langjährigen mittleren Kennwerten ab. Es wird daher häufig eine minimale Beobachtungsdauer von 20 Jahren empfohlen (z.B. DVWK, 1983). Im regionalen Kontext ist darüber hinaus die Wahl einer einheitlichen Bezugsperiode erforderlich, um Kennwerte verschiedener Gebiete miteinander vergleichbar zu machen. In dieser Studie wurde daher eine einheitliche Bezugsperiode von 1977-1996 (20 Jahre) gewählt. Pegel, für die Abflussmessungen während der gesamten Periode vorliegen, werden hier als lange Zeitreihen bezeichnet, jene mit kürzeren Beobachtungen werden kurze Zeitreihen bezeichnet. Die langen Zeitreihen entsprechen dem ersten Datensatz der 325 Gebiete, die kurzen Zeitreihen werden im erweiterten Datensatz der 481 Gebiete berücksichtigt (Abschnitt 2.2). Für kurze Zeitreihen ist eine Korrektur erforderlich, um die Niederwasserkennwerte mit der Bezugsperiode 1977-1996 kompatibel zu machen, welche in der Folge erläutert wird.

4.2 Zeitlicher Abgleich

Der generellen Strategie der Entwicklung des Regionalisierungsverfahrens folgend, wurden verschiedene Methoden zur Ermittlung langjähriger Niederwasserkennwerte aus kurzen Abflussreihen verglichen (Laaha und Blöschl, 2005). Alle betrachteten Methoden gleichen Niederwasserkennwerte an langjährige Klimabedingungen an, und werden deshalb als Klimakorrektur bezeichnet. Die Methoden zur Klimakorrektur bestehen aus zwei Schritten, Wahl des Referenzpegels und Kennwertkorrektur (engl.: record augmentation). Sie verwenden Informationen räumlich nahe liegender Pegel mit längerer Abflussbeobachtung. Bei den Methoden zur Wahl des Referenzpegels wurden hier untersucht: nächster Unterliegerpegel (downstream site), ein Pegel mit ähnlichen Gebietseigenschaften (catchment similarity), und maximal 10 Pegel mit der größten Korrelation der Jahresniederwässer (correlation of annual low flows). Die Genauigkeit der Methoden wird durch einen Vergleich der korrigierten Niederwasserwerte hypothetisch verkürzter Reihen mit den analogen Werten aus den langen Reihen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Methode, welche den nächsten Unterliegerpegel zur Korrektur heranzieht (unweighted downstream site method), die genauesten Werte liefert. Niederwasserkennwerte, die mit dieser Methode aus 5 Jahren Abflussdaten abgeleitet werden, erklären 95% der Varianz der Kennwerte der 20 jährigen Reihe und besitzen einen Standardfehler von $RMSE=0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. Das sind nur 10% des tatsächlichen Wertes Q_{95} (Abb. 3). Diese Fehler sind zwar etwas höher als jene der gemessenen Niederwasserkenngrößen (z.B. Laaha, 2000, berechnete mittlere Fehler von ca. 3%), aber geringer als die Fehler eines Regressionsmodells. Das in dieser Studie verwendete Regressionsmodell weist beispielsweise einen relativen Standardfehler von 12% bis 44% für verschiedene Regionen Österreichs auf. Deshalb wurde in dieser Studie auch der zweite Datensatz mit mindestens fünf jährigen Abflussreihe verwendet.

Die Kennwertkorrektur der Q_{95} aus den kurzen Zeitreihen erfolgte beim österreichischen Verfahrens durch den Proportionalitätsansatz (z.B. Kroiß et al., 1996):

$$QS_{pred} = QS_0 \left(\frac{QD}{QD_0} \right) \quad (1)$$

In dieser Gleichung bezeichnet QS_{pred} den korrigierten Kennwert Q_{95} am Zielpegel (d.h., am Pegel mit kurzer Abflussbeobachtung), QS_0 den unkorrigierten Kennwert Q_{95} am Zielpegel für die kurzen Zeitreihen, QD_0 den Kennwert Q_{95} am Referenzpegel für die kurzen Zeitreihen, und QD den Kennwert Q_{95} am Referenzpegel für die Gesamtperiode.

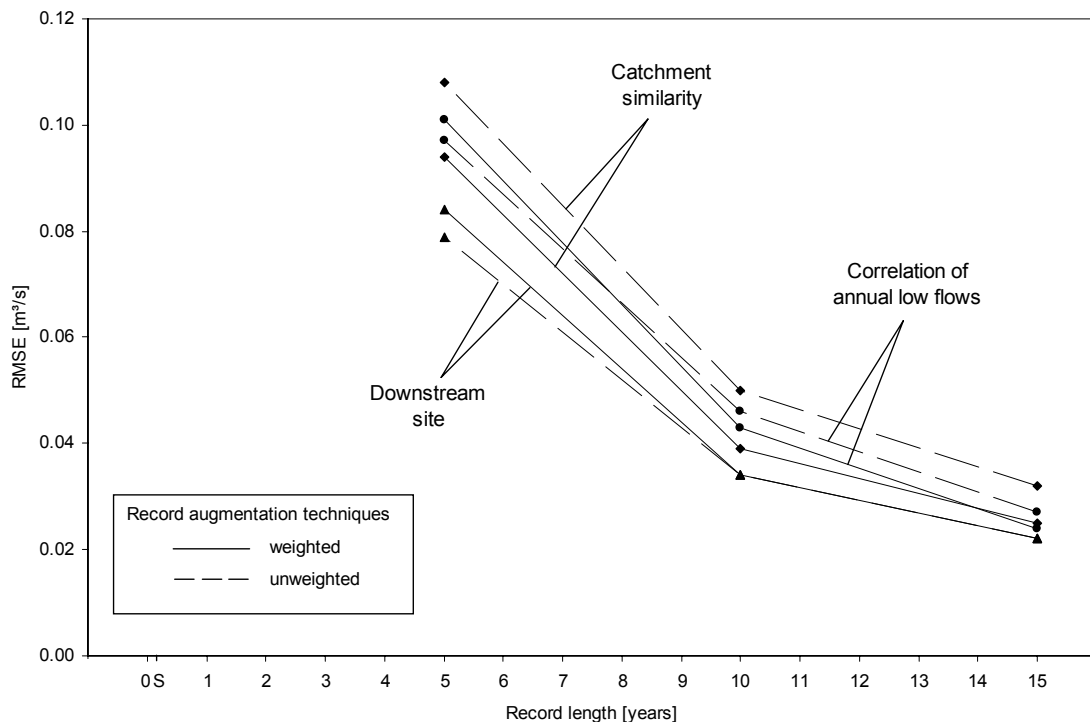


Abb. 3: Absoluter Fehler RMSE (m^3/s) des Niederwasserabflusses Q_{95} kurzer Reihen (<20 Jahre) im Vergleich zum Niederwasserabfluss der 20 jährigen Reihe. Drei Verfahren zur Wahl des Referenzpegels werden kombiniert mit zwei Ansätzen zur Kennwertkorrektur (gewichtet, nicht gewichtet). Aus Laaha and Blöschl (2005).

5. Unbeobachtete Gebiete

5.1 Gruppierung der Einzugsgebiete

Die Grundlage für ein hydrologisch begründbares Regressionsmodell ist die Homogenität der zur Eichung verwendeten Gebiete in Bezug auf die wichtigsten niederwasserrelevanten Prozesse. Vier Methoden zur Gruppierung von Einzugsgebieten wurden hier verglichen (Laaha and Blöschl, 2006a). Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung des Modells mit dem geringsten Regionalisierungsfehler. Die betrachteten Gruppierungsmethoden sind die Residuenmuster methode (z.B. Hayes, 1992; Aschwanden und Kan, 1999a), die gewichtete Clusteranalyse (Nathan and McMahon, 1990), der Regressionsbaum (Breiman et al., 1984; Laaha, 2002) und die Gruppierung in acht Saisonalitätsregionen (Laaha and Blöschl, 2006b). Jedes dieser Verfahren verwendet Niederwasserdaten und

Einzugsgebietsdaten bei der Bildung von Gruppen ähnlicher Gebiete. Die Regression zwischen q_{95} und Gebietskennwerten erfolgt getrennt für jede Gruppe. Die Regressionsgleichungen wurden jeweils durch schrittweise Regression optimiert. Die Güte der einzelnen Gruppierungsmethoden wird mittels Kreuzvalidierung verglichen, wodurch eine zuverlässige Angabe der Genauigkeit für Gebiete ohne Abflussmessungen möglich ist. Die Gruppierung auf Basis von Saisonalitätsregionen erweist sich als die beste Methode (Abb. 4). Das darauf basierende regionale Regressionsmodell erklärt 70% der räumlichen Varianz von q_{95} . Die hohe Güte dieser Methode dürfte mit den markanten saisonalen Unterschieden der Niederwasserprozesse in Österreich zusammenhängen. Winterniederwässer sind eine Folge von Frost und Schneerückhalt, während Sommerniederwässer eine Folge des relativ großen Bodenfeuchtedefizits in Einzugsgebieten des Flachlands im Sommer sind. Die Gruppierung mittels Regressionsbaum erweist sich als zweitbeste Methode (64% erklärte Varianz), die Güte der Residuenmustermethode ist ähnlich (63% erklärte Varianz). Die Gruppierung mittels gewichteter Clusteranalyse erklärt nur 59% der räumlichen Varianz von q_{95} und erzielt somit nur eine geringe Verbesserung gegenüber dem globalen Regressionsmodell, das keinerlei Gruppierung einbezieht (57% erklärte Varianz). Eine Analyse der Residueneigenschaften aller Methoden belegt ebenfalls die Vorteile der Gruppierung auf der Basis von Saisonalitätsregionen, zeigt aber auch, dass alle Methoden zur Unterschätzung der Niederwasserspenden q_{95} in Einzugsgebieten mit hohen Spenden neigen (Abb. 4). Das regionale Regressionsmodell basierend auf Saisonalitätsregionen erweist sich in allen Analysen als die am besten geeignete Methode und wird daher im weiteren für die Schätzung von Niederwasserkennwerten für unbeobachtete Gebiete verwendet.

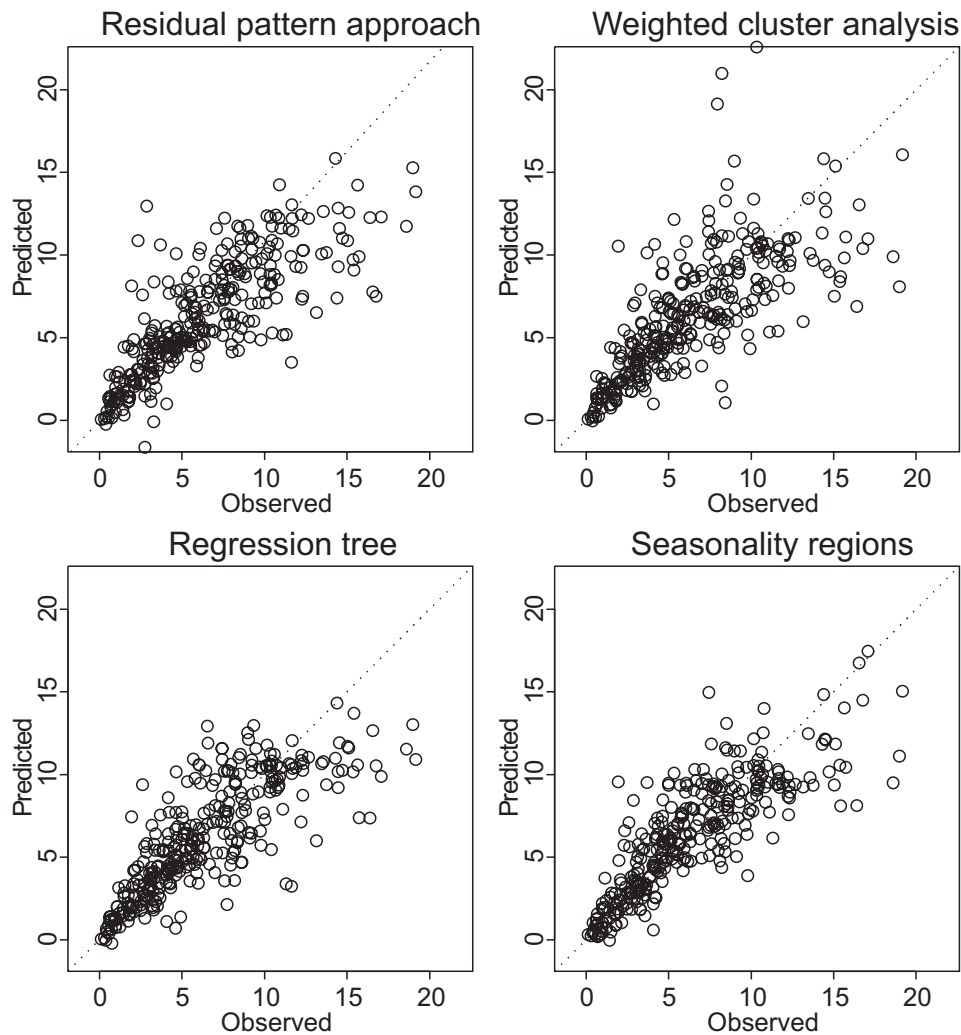


Abb. 4: Kreuzvalidierung von regionalisierten (predicted) gegen beobachtete (observed) Niederwasserspenden q_{95} ($l s^{-1} km^{-2}$). Jedes Diagramm entspricht einem Regionalisierungsverfahren, jeder Punkt einem Einzugsgebiet. Aus Laaha and Blöschl (2006a).

5.2 Regressionsmodell

Tab. 1 zeigt das regionale Regressionsmodell für Österreich, welches aus separaten Regressionsgleichungen für die acht Saisonalitätsregionen aus Abschnitt 5.1 besteht. Das Modell besitzt in den meisten Regionen mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 60% und 70% eine gute Modellanpassung. Saisonalitätskenngrößen beinhalten offenbar einen hohen Informationsgehalt für die Regionalisierung von Niederwässern. Die Regressionsmodelle für die Steiermark (89%) und Unterkärnten (83%) weisen ein höheres Bestimmtheitsmaß auf. Dem entgegen weist der Alpenraum mit 51% ein niedrigeres Bestimmtheitsmaß auf. Dieser niedrige Koeffizient ist nicht überraschend, da drei Saisonalitätstypen, die keine zusammenhängenden Regionen bilden, in eine Region zusammengefasst wurden. Eine Detailanalyse für den Alpenraum ergab, dass insbesondere hochalpine Gebiete mit einer mittleren Seehöhe von über 1800 m ü.A. eine geringere Modellanpassung aufweisen, da für diese Höhenstufe nur sehr wenige Eichgebiete im Datensatz vorhanden waren. Für hochalpine Gebiete wurde daher ein

spezielles Regressionsmodells erstellt, das an weiteren 105 Einzugsgebieten dieser Höhenstufe geeicht wurde (Laaha und Blöschl, 2006c). Dieses Modell besitzt ein Bestimmtheitsmaß von 68% und wird für Gebiete mit einer mittleren Seehöhe > 1800 m ü.A. verwendet. Für Gebiete zwischen 1800 und 1200 m werden die Modelle Alpen < 1200m und Hochalpen > 1800m in Abhängigkeit von der mittleren Seehöhe linear kombiniert.

Tab. 1: Regionales Regressionsmodell der Niederwasserspende q_{95} ($l s^{-1} km^{-2}$) in Österreich.

Gruppe	Region	R ²	Modell: $\hat{q}_{95} =$
A-C	Alpen < 1200m	51%	$0.67+0.40 \cdot P+0.17 \cdot G_Q-0.01 \cdot G_C+$ $6.43 \cdot L_{WE}+0.14 \cdot S_M-0.04 \cdot L_R-0.20 \cdot H_0$
A-C	Hochalpen > 1800 m	68%	$-8.21+2.64 \cdot P+0.74 \cdot H_M-0.02 \cdot G_C-0.12 \cdot P \cdot H_M$
D	Voralpen (Steiermark)	89%	$-7.99+1.08 \cdot P+0.04 \cdot L_F$
E	Voralpen (Vorarlberg)	60%	$18.20-0.18 \cdot S_{MO}$
1	Flach- und Hügelland im Norden und Osten	71%	$-0.12+0.11 \cdot S_M+0.05 \cdot G_{GS}+0.02 \cdot G_C$
2	Böhmische Masse	64%	$-3.31+1.96 \cdot P_W$
3	Alpenvorland (Oberösterreich)	68%	$-10.04-0.76 \cdot D+3.27 \cdot P-2.22 \cdot H_0$
4	Flyschzone	63%	$-6.17+0.06 \cdot G_L+2.07 \cdot P_S-0.06 \cdot L_F$
5	Unterkärnten	83%	$-17.48+3.56 \cdot D+20.06 \cdot L_{WE}$

5.3 Räumlicher Abgleich

Das regionale Regressionsmodell wurde zur Berechnung einer österreichweiten Karte der natürlichen Niederwasserspende q_{95} für ca. 21 000 Zwischeneinzugsgebiete des Gewässernetzes (Behr, 1989) angewendet. Zur Verringerung des Regionalisierungsfehlers wurden die Spenden an die lokalen Pegelmessungen angepasst, sofern diese vorhanden waren. Dabei wurden die Spenden der Teilgebiete i mit einem Skalierungsfaktor c multipliziert, der dem Verhältnis aus beobachteter Spende und dem Mittelwert der regionalisierten Niederwasserspende im jeweiligen Pegelgebiet g entspricht:

$$c = \frac{\Delta q_{95}^g \cdot \sum A_i}{\sum q_{95}^i \cdot A_i} \quad (2)$$

Die Größe $\Delta q_{95}^g = \frac{\Delta Q_{95}^g}{\sum q A_i}$ ist die Niederwasserspende des Pegel-zwischeneinzugsgebiets g , A_i ist die Fläche des Flusszwischeneinzugsgebiets i innerhalb des Pegelzwischeneinzugsgebiets, und q_{95}^i ist die Regressions-schätzung der Niederwasserspende des Flusszwischeneinzugsgebiets. Dieser räumliche Abgleich

hatte sich in einer Detailstudie als genauer als alternative Abgleichverfahren, sowie die unabgeglichene Regressionsschätzung erwiesen (Laaha und Blöschl, 2006c). Der Abgleich erfolgte für den Datensatz der 481 Gebiete mit 5 bis 20 Jahren Abflussbeobachtungen, wobei die Kennwerte aus kurzen Beobachtungsreihen der Klimakorrektur unterzogen wurden.

6. Zusammenfassung des österreichischen Verfahrens

In diesem Beitrag wurde ein konsistentes Verfahren zur Schätzung von Niederwässern an beobachteten und unbeobachteten Gewässerstellen in Österreich vorgestellt. Der gewählte Kennwert Q_{95} ist jener Durchfluss, dem eine 95-prozentige Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet ist. Die Ergebnisse beziehen sich auf natürliche Abflussverhältnisse des Bezugszeitraumes 1977-1996. Die generelle Strategie des Verfahrens liegt in einer Kombination von Modellen je nach Datenlage (lange Abflussreihen, kurze Abflussreihen, keine Abflussreihen), und einer optimalen Auswahl der Methoden für die österreichischen Gegebenheiten. Hierzu wurden jeweils verschiedene Methoden mittels Kreuzvalidierung verglichen, um für jede Datensituation die geeignetste Methode zu finden.

Für Gebiete mit mindestens 20 Jahren Abflussbeobachtung liefert die direkte Berechnung der Kennwerte aus der gemessenen Abflusszeitreihe des Bezugszeitraums die genauesten Resultate. Für Gebiete mit kürzerer Abflussbeobachtung werden die aus den Abflussdaten ermittelten Kennwerte einer Klimakorrektur unterzogen, um sie mit der Referenzperiode 1977-1996 vergleichbar zu machen. Für Gebiete ohne Abflussmessungen (unbeobachtete Gebiete) wird ein prozessbasiertes regionales Regressionsmodell verwendet, das aus separaten Regressionsmodellen für acht Regionen mit ähnlichem saisonalen Auftreten von Niederwässern besteht.

Die Modelle wurden auf 21 000 Flusszwischenzugsgebiete in Österreich angewendet und mit den Messwerten der Pegelzwischenzugsgebiete räumlich abgeglichen. Die sich daraus ergebende Karte der natürlichen Niederwasserspende q_{95} ($\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) in Österreich ist in Abb. 5 dargestellt. Durch Aggregation der Teilflächen lässt sich daraus für jede beliebige Gewässerstelle in Österreich der Niederwasserdurchfluss Q_{95} ermitteln.

Bei der Erstellung der Karte stand die regionale Betrachtungsweise im Vordergrund. Sollen die Ergebnisse für lokale Fragestellungen verwendet werden, so ist es sinnvoll, zusätzliche Informationen über die lokalen hydrologischen Verhältnisse heranzuziehen. Auch ist es klar, dass die Niederwasserwerte der Abb. 5 mit einer gewissen Unschärfe behaftet ist. Laaha und Blöschl (2006c) schätzen diese Unschärfe ab und weisen eine untere und obere Vertrauensgrenze des Q_{95} aus. Dieser Vertrauensbereich könnte auch für die Einschätzung der lokalen Niederwassersituation hilfreich sein.

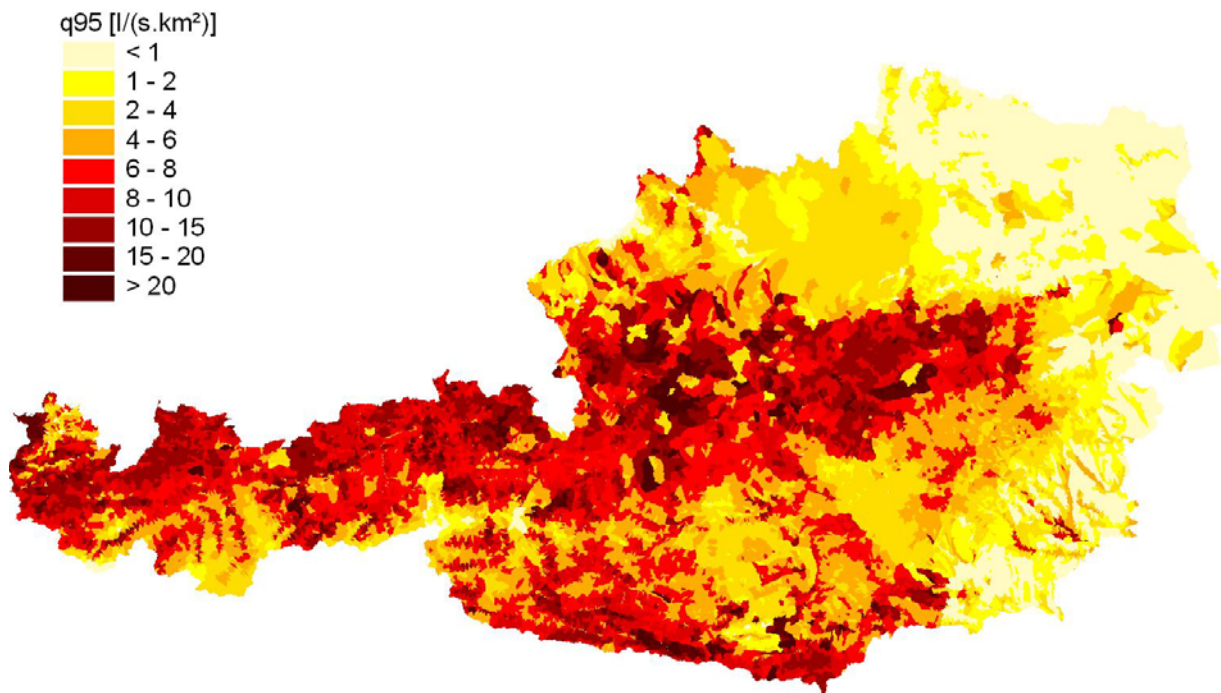


Abb. 5: Regionalisierte Niederwasserspende q_{95} ($l s^{-1} km^{-2}$) in Österreich.

7. Danksagung

Unser Dank gilt dem Hydrographischen Dienst in Österreich für die Bereitstellung der Abflussdaten, und Prof. Harald Strelec, Institut für Angewandte Statistik und EDV, BOKU Wien, für vielfältige Anregungen und kritische Diskussionen bei der Entwicklung des Regionalisierungsverfahrens.

8. Literatur

Aschwanden, H. und Kan, C. (1999a) Die Abflussmenge Q347 - Eine Standortbestimmung. *Hydrologische Mitteilungen*, Nr. 27. Landeshydrologie und -geologie, Bern, Schweiz.

Aschwanden, H. und Kan, C. (1999b) Niedrigwasser – Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge Q347. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.8, 3. Lieferung, Landeshydrologie und -geologie (ed.), Bern.

Behr, O. (1989) Digitales Modell des Oberflächenentwässerungssystems von Österreich. Institut für Hydraulik Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien (Forschungsbericht 11, Wien).

Boorman, D.B., Hollis, J.M. and Lilly, A. (1995) Hydrology of soil types: a hydrologically based classification of the soils of the United Kingdom. Institute of Hydrology Report No.126, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R. and Stone, C.J. (1984) *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, Belmont, California.

- Draper, N.R. and Smith, H. (1998) Applied Regression Analysis (Third Edition). John Wiley and Sons Inc.
- DVWK (1983) Niedrigwasseranalyse, Teil I: Statistische Untersuchungen des Niederwasserabflusses. DVWK-Regel 120, Paul Parey, Hamburg.
- Efron, B. and Tibshirani, R.J. (1993) An introduction to the bootstrap. Monographs on Statistics and Applied Probability, vol. 57. Chapman and Hall, New York.
- Engeland, K., Hisdal, H. and Beldring, S. (2006) A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. NVE Report, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo, Norway, 34 pp.
- Gustard, A., Bullock, A. and Dixon, J.M. (1992) Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 pp., append.
- Gustard, A., Young, A.R., Rees, G. and Holmes, M.G.R. (2004) Operational Hydrology. In: Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A.J. (eds.), 2004. Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science no. 48, Elsevier, NL.
- Hayes, D.C., (1992) Low flow characteristics of streams in Virginia. US Geological Survey, Water Supply Paper 2374.
- Henderson, R.D., Woods, R.A. and Schmidt, J. (2004) A new low flow model for New Zealand - Part 3, New Zealand Hydrological Society Symposium; "The Water Balance", Queenstown, New Zealand.
- Holmes, M.G.R., Young, A.R., Gustard, A. and Grew, R. (2002) A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), 721-732.
- Institute of Hydrology (ed.) (1980) Low Flow Studies Report. Institute of Hydrology, Crowmarsh Gifford, Wallingford, UK.
- Jennings, M.E., Thomas, Jr., W.O. and Riggs, H.C. (1994) Nationwide summary of U.S. Geological Survey regional regression equations for estimating magnitude and frequency of floods for ungauged sites, 1993: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4002, 196 p. (Superseded by WRIR 01-4168).
- Jungwirth, M., Haidvogel, G., Moog, O., Muhar, S. und Schmutz, S. (2003) Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. Facultas Universitätsverlag, Wien; ISBN 3-8252-2113-X, 552 p.
- Kresser W, Kirnbauer R. und Nobilis F., (1985) Überlegungen zur Ermittlung von Niederwasserkenngrößen. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 54.
- Kroiß, H., Gutknecht, D., Schmid, C., Blöschl, G., Fenz, R., Hinteregger, J. und Honsowitz, H. (1996) Methodik und Kritik der ökologischen und ökonomischen Bewertung von regionalen Lösungen zur Abwasserentsorgung am Beispiel des Lainsitztales. Wiener Mitteilungen, Band 130, TU Wien.

- Laaha, G. (2000) Zur Beurteilung der Genauigkeit von Niederwasserkennwerten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 80, pp. 61-68.
- Laaha, G. (2002) Modelling summer and winter droughts as a basis for estimating river low flows. In: FRIEND 2002 — Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice. Proceedings of the Fourth International Conference held in Cape Town, South Africa, March 2002. IAHS Publ. 274, pp. 289–295.
- Laaha, G. und Blöschl G. (2003) Saisonalität von Niederwasserspenden in Österreich. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 82, pp. 59-68.
- Laaha, G. and Blöschl, G. (2005) Low flow estimates from short streamflow records—a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306, 264–286.
- Laaha, G. and Blöschl, G. (2006a) A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323/1-4.
- Laaha, G. and Blöschl, G. (2006b) Seasonality indices for regionalising low flows. *Hydrological Processes*, 2006 (in press).
- Laaha, G. and Blöschl, G. (2006c) A national low flow estimation procedure for Austria. To appear in: *HSJ*.
- Laaha, G., Godina, R. Lorenz, P. und Blöschl, G., (2005) Niederwasserabfluss (Low flow). In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Hydrologischer Atlas Österreichs, Karte 5.5; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag Wien, Wien; ISBN 3-85437-250-7.
- Nathan, R.J. and McMahon, T.A. (1990) Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, 121, 217–238.
- Ries, K.G. (2002) STREAMSTATS: A U.S. Geological Survey web site for stream information. Hydroinformatics 2002: Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK. IWA Publishing.
- Smakhtin, V.U. (2001) Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147–186.
- Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A.J. (eds.), (2004) Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science no. 48, Elsevier, NL.
- Young, A.R., Grew, R. and Holmes, M.G.R. (2003) Low Flows 2000: a national water resources assessment and decision support tool. *Water Science and Technology*, 48(10), 119-126.

Anschrift der Verfasser:

Univ.Ass. Dr. Gregor Laaha
Institut für Angewandte Statistik und EDV
Universität für Bodenkultur Wien
Gregor Mendel-Straße 33, A-1180 Wien
email: gregor.laaha@boku.ac.at

A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at, <http://www.hydro.tuwien.ac.at>

