

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

## **Methoden der hydrologischen Regionalisierung**

**Band 197 - Wien 2006**

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

## **Methoden der hydrologischen Regionalisierung**

**Band 197 - Wien 2006**



# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

Band 197

## **Methoden der hydrologischen Regionalisierung**

ÖWAV – Seminar  
im Lebensministerium  
18. - 19. Mai 2006

Herausgeber:  
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c. Dieter Gutknecht  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Technische Universität Wien

## Veranstalter:



Institut für Wasserbau und  
Ingenieurhydrologie  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/223  
1040 Wien



Österreichischer Wasser- und  
Abfallwirtschaftsverband  
Marc-Aurel-Straße 5  
1010 Wien



[lebensministerium.at](http://lebensministerium.at)

Bundesministerium für Land- und  
Forstwirtschaft, Umwelt und  
Wasserwirtschaft  
Stubenring 1  
1012 Wien

**ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT  
FÜR HYDROLOGIE**

Österreichische Gesellschaft für Hydrologie  
Sitz: Hydrographisches Zentralbüro  
Marxergasse 2  
1030 Wien

Druck: Riegelnik  
Piaristengasse 19  
1080 Wien

ISBN 3-85234-088-8

## **Vorwort**

Die Hydrologie, als Grundlagendisziplin der Wasserwirtschaft, ist stark von der Datensituation geprägt. Alle Aufgaben der Hydrologie erfordern sowohl Messdaten, als auch aggregierte Daten. In vielen Fällen liegen allerdings für ein Untersuchungsgebiet bzw. einen betrachteten Standort keine geeigneten Daten vor. Für solche Situationen kommt die indirekte Ableitung der gesuchten Kenngrößen unter Verwendung von Daten in der Nähe in Frage. In der Hydrologie wird für diese methodische Fragestellung der Begriff "Regionalisierung" verwendet. Dieser Begriff leitet sich davon ab, dass dabei eine regionale Übertragung der Daten – unter Zusammenschau von Informationen in der Region – durchgeführt wird.

Methoden der hydrologischen Regionalisierung werden besonders dann wichtig, wenn der Schwerpunkt nicht auf Einzelmaßnahmen sondern auf einer flächendeckenden Erfassung der Vorgänge und des Zustandes liegt. Mit dem Inkrafttreten der EU-Wasserrahmenrichtlinie hat die hydrologische Regionalisierung an Brisanz gewonnen, da die Wasserrahmenrichtlinie die Erstellung von flussgebietsbezogenen Bewirtschaftungsplänen mit Bestandsanalyse, Umweltzielen, Monitoring- und Maßnahmenprogrammen verlangt, für die regionalisierte, hydrologische Informationen – mit nachvollziehbaren Methoden entwickelt – bereitgestellt werden müssen. Auch auf internationaler Ebene ist die Regionalisierung hochaktuell. Die Internationale Gesellschaft für Hydrologie (IAHS) etwa hat unlängst die Dekade der "Prediction of Ungauged Basins (PUB)" ausgerufen.

Es schien deshalb an der Zeit, ein Seminar zum Thema Regionalisierung abzuhalten. Ziel des gemeinsam vom ÖWAV, der TU Wien, dem Lebensministerium und der ÖGH veranstalteten Seminars war es, eine Standortbestimmung in Praxis und Forschung durchzuführen, verschiedene – auch neuere – Methoden vorzustellen und deren Praxistauglichkeit zu bewerten. Weiter sollte ein Überblick über die verfügbaren Daten gegeben werden, und ein österreichweiter Erfahrungsaustausch über die komplexen Probleme der hydrologischen Regionalisierung stattfinden. Der Zielsetzung entsprechend war das Seminar in die Themenblöcke: Methodische Grundlagen; Niederschlag; Niederwasser und Hochwasser; Erfahrungsberichte; Ereigniskenngrößen; Grundwasser; und Wasserrahmenrichtlinie gegliedert.

Der vorliegende Band fasst die schriftlichen Beiträge der Seminarvorträge zusammen, um die Seminarinhalte einem weiteren Fachpublikum zugänglich zu machen.

Günter Blöschl, Reinhold Godina, Ralf Merz

Wien im Mai 2006

ISBN 3-85234-088-8

## **AUFGABEN UND METHODEN DER HYDROLOGISCHEN REGIONALISIERUNG**

Reinhold Godina und Günter Blöschl

### **1. Einleitung**

Alle Aufgaben der Hydrologie erfordern Daten. In vielen Fällen liegen allerdings für das Untersuchungsgebiet bzw. den betrachteten Standort keine geeigneten Daten vor und es ist nicht möglich sie im Bearbeitungszeitraum mit der notwendigen Genauigkeit zu messen. Für solche Situationen kommt die indirekte Bestimmung der gesuchten Kenngrößen unter Verwendung von Daten in der Region in Frage. Dafür geeignete Methoden sind das Thema dieses Seminars.

Die Anforderungen an die Regionalisierung leiten sich aus den unterschiedlichen wasserwirtschaftlichen Aufgaben und den dazu notwendigen hydrologischen Grundlagen ab. Man kann grundlagenorientierte Aufgaben der Hydrologie wie

- Vertiefung des Verständnisses hydrologischer Prozesse,
- Messnetzplanung,

und angewandte Aufgaben der Wasserwirtschaft wie

- Bemessung
- Bewirtschaftung
- Vorhersage, und
- Monitoring

unterscheiden. Monitoring ist insbesondere im Zusammenhang mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ein wichtiges Thema geworden, da für die Aufstellung von flussgebietsbezogenen Bewirtschaftungsplänen mit Bestandsanalyse, Umweltzielen, Monitoring- und Maßnahmenprogrammen regionalisierte hydrologische Informationen bereitgestellt werden müssen. Immer mehr wird die natürliche Ressource Wasser durch menschliche Eingriffe beeinflusst. Zur Beschreibung des mengenmäßigen Zustandes der Wasserführungen an den österreichischen Gewässern und Grundwasserkörpern sind zukünftig Analysen zur räumlich-zeitlichen Auswirkung dieser Beeinflussungen erforderlich. So beeinflusst z.B. der kraftwerksbedingte Schwellbetrieb und die Speicherabgaben der Zubringer in Niederwasserzeiten auch den Abfluss der Donau. Der steigende Wasserbedarf der Industrie, der Bevölkerung und der Stromerzeugung erfordert eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser und Methoden, die es ermöglichen extreme Abflüsse in Raum und Zeit abzuschätzen.

## 2. Entwicklung der Regionalisierung in Österreich

Es waren die katastrophalen Hochwasserereignisse 1897 und 1899, die den Aufbau des hydrologischen Mess- und Informationswesens auf österreichischem Staatsgebiet gefördert und der damals noch jungen hydrologischen Wissenschaft Aufmerksamkeit gebracht haben. Danach entstanden Messnetze, um den sich ändernden Bedürfnissen und Anforderungen gerecht zu werden. In Anlehnung an die von Emmenegger (1990) für die Schweiz identifizierten Perioden lassen sich für die Entwicklung in Österreich schwerpunktmäßig folgende Phasen angeben:

1850 bis heute:	Hochwasserschutz
1900 bis 1960:	Entwicklung der Wasserkraft
1960 bis heute:	Nutzung des Grundwasserdargebots, Wasserbilanz
1970 bis heute:	Gewässerreinigung
1980 bis heute:	Beitrag zur Umweltüberwachung

Die Übertragung der durch die Messnetze an den Messpunkten gesammelten hydrologischen Daten auf unbeobachtete kleine Einzugsgebiete und Zwischeneinzugsgebiete war in allen Phasen eines der wesentlichsten Ziele der regionalen Hydrologie. Die zur Übertragung angewandten Methoden entwickelten sich entsprechend den Anforderungen, der Datenlage und den vorhandenen technischen Möglichkeiten. Durch Interpolation wurden die gemessenen Niederschläge zusammengefasst und für eine flächenhafte Darstellung der Ereignisniederschläge am Ende des 19. Jahrhunderts verwendet (Lauda, 1900). Für die Festlegung von Bemessungsabflüssen wurden zahlreiche einfache Regressionsbeziehungen für die Abflusspende in Abhängigkeit von der Fläche entwickelt. Eine der bekanntesten Formeln ist jene nach Wundt (1949) in der Form:

$$q = c \cdot A^m \quad (1)$$

wobei  $q$  die Abflusspende,  $c$  ein Faktor,  $A$  die Einzugsgebietsfläche und  $m$  die Steigung der Beziehung in der doppeltlogarithmischen Darstellung ist. Diese Funktion wird noch immer zur Bestimmung von Hochwasserspenden in unbeobachteten Gebieten herangezogen, weil sie die Abhängigkeit der Hochwasserspende von der Einzugsgebietsgröße für viele österreichische Gewässer ausreichend genau beschreibt, sofern die Parameter  $c$  und  $m$  zutreffend gewählt werden. Zur Regionalisierung hydrologischer Daten werden seit etwa 20 Jahren geographische Informationssysteme (GIS) angewandt. Damit wurde einerseits die Möglichkeit zur rascheren Verknüpfung landbezogener Informationen mit hydrologischen Daten aus Punktmessungen geschaffen und andererseits Methoden zur Interpolation von Punktdaten auf die Fläche zur Verfügung gestellt. Parallel mit der Entwicklung von GIS veränderten sich auch die Methoden der hydrologischen Regionalisierung. Mit Hilfe von GIS konnten viele hydrologisch relevante Daten zur Beschreibung der Einzugsgebiete der Analyse

zugänglich gemacht werden, die zuerst für multiple Regressionsanalysen und in weiterer Folge zur Entwicklung von Wasserbilanzmodellen verwendet wurden.

Auf Initiative der Österreichischen Gesellschaft für Hydrologie (ÖGH) wurde im Jahr 1994 der Entschluss gefasst, das hydrologische Fachwissen, das durch Beobachtung, Analyse und Forschung erarbeitet wurde, im Rahmen des Projektes Hydrologischer Atlas Österreichs (HAÖ) zu konzentrieren und einem breiten Publikum zugänglich zu machen (BMLFUW, 2005a). Der HAÖ beinhaltet in seiner 2. Lieferung eine homogene Darstellung von hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Informationen auf bundesweiter Ebene. An dieser Stelle soll vor allem auf die Regionalisierung der Komponenten des Wasserkreislaufes hingewiesen werden, die der HAÖ enthält und für viele Fragestellungen der Hydrologie und Wasserwirtschaft wertvolle Informationen bereit hält.

### 3. Regionale Wasserbilanz

Die Darstellung der Komponenten des Wasserkreislaufes in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung ist ein zentrales Thema der hydrologischen Wissenschaft. Auch für ein wasserreiches Land wie Österreich ist die Verfügbarkeit von Wasser ein stets aktuelles Thema. Trotz des verhältnismäßig sehr hohen mittleren Gebietsniederschlags gibt es regional Trockengebiete im Süden, im Osten und im Norden des Landes und vor allem in Trockenperioden lokal Probleme mit dem nutzbaren Wasserdargebot. Die Grundgleichung für die Wasserbilanz eines bestimmten Gebietes über einen bestimmten Zeitraum ist:

$$N = A + V + \Delta S \quad (2)$$

woraus sich die Wechselwirkung zwischen dem Niederschlag ( $N$ ), dem oberirdischen Abfluss ( $A$ ), der Verdunstung ( $V$ ) und der Speicheränderung im Gebiet ( $\Delta S$ ) erkennen lässt. Wird die Wasserbilanz durch Mittelwertbildung über einen längeren Zeitraum (z.B. ein Jahr) und für größere Einzugsgebiete ermittelt, kann die Speicheränderung vernachlässigt werden. Die Ermittlung der Wasserbilanz Österreichs nach Kresser (1965) war eine der ersten Darstellungen der Bilanzgrößen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung für österreichische Flussgebiete der Größe 2000 km<sup>2</sup> bis über 11000 km<sup>2</sup> und einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr. Die zweite Lieferung des Hydrologischen Atlas Österreichs enthält ebenfalls eine Darstellung der Wasserbilanzgrößen für die ein räumlich verteiltes, konzeptionelles Abflussmodell für das österreichische Staatsgebiet in Monatsschritten angewendet wurde (Klink et al., 2005). Parajka et al. (2005) haben für 538 österreichische Pegel Einzugsgebiete die regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich mit einem konzeptionellen, kontinuierlichen Wasserhaushaltsmodell auf Tagesbasis berechnet. Vergleicht man die langjährigen Mittelwerte der Wasserbilanz nach Kresser mit den Ergebnissen der genannten Wasserbilanzmodelle mit dem selben räumlichen (österreichweit) und zeitlichen (mehrjähriges Jahresmittel) Bezug (Tabelle 1), so erkennt man nur geringe Unterschiede, die teilweise mit den unterschiedlichen Bezugsperioden erklärt werden können.

**Tab. 1:** Vergleich unterschiedlicher Wasserbilanzberechnungen (Kresser, 1994; Klink et al., 2005; Parajka et al., 2005).

	Kresser 1961-90	Klink 1961-90	Parajka 1976-97
Niederschlag [mm]	1170	1144	1112
Verdunstung [mm]	516	510	499
Abfluss [mm]	654	634	604

Diese Übereinstimmung mag zwar auf den ersten Blick beruhigen, aber auf keinen Fall als Beweis angesehen werden, dass der Wasserkreislauf in Wirklichkeit so einfach zu bestimmen ist. Wir haben es vielmehr mit einem außerordentlich vernetzten Vorgang – mit zwischengeschalteten Kreisläufen – zu tun, bei dem in immer stärkerem Ausmaß die menschlichen Eingriffe hinzukommen. Selbst die räumliche und zeitliche Variabilität des Niederschlages auf österreichischem Bundesgebiet weist infolge der vielfältigen klimatischen, orographischen und geologischen Verhältnisse große Unterschiede auf, die in den Mittelwerten nur wenig zum Ausdruck kommen. Außerdem könnte eine Klimaänderung den Wasserkreislauf in naher Zukunft in der gewohnten räumlichen und zeitlichen Variabilität nachhaltig und rasch ändern und so den Wert der bisher beobachteten hydrologischen Information beeinträchtigen.

Die Wasserbilanz nach Kresser wurde im Wesentlichen durch Interpolation der beobachteten Eingangsgrößen Niederschlag und Abfluss in einer groben Vereinfachung in der räumlichen und zeitlichen Auflösung erstellt und kann auch heute noch als ausreichend genau für die Beschreibung der Verhältnisse in Österreich in diesem Maßstab bezeichnet werden. Die Wasserbilanz eines Gebietes beinhaltet neben den zentralen Hydrologischen Kenngrößen  $N$ ,  $A$  und  $V$  auch Angaben zum Wasserbedarf der Bevölkerung, der Industrie und der Landwirtschaft. In diesem Zusammenhang soll auf die Schwierigkeit hingewiesen werden, Zugang zu diesen Angaben in der für hydrologische Daten üblichen räumlichen und zeitlichen Qualität zu erhalten.

#### 4. Aufgaben der Regionalisierung

Gegliedert nach den wichtigsten Komponenten des Wasserkreislaufes (Niederschlag, Abfluss und Grundwasser) ergeben sich folgende typische Aufgaben der Regionalisierung:

##### Niederschlag

- Ereignisanalyse: Räumliche Verteilung von Ereignisniederschlägen zur Dokumentation von Hochwasserereignissen
- Regionalisierung statistischer Kenngrößen extremer Niederschläge: Festlegung des Bemessungsniederschlages, z.B. für die Siedlungswasserwirtschaft, zur

Dimensionierung von Hochwasserentlastungsanlagen, den Flussbau und die Schutzwasserwirtschaft

- Interpolation des Niederschlages für einzelne Zeitschritte als Eingangsgröße für Hochwasserprognosemodelle
- Bestimmung des Gebietsniederschlages zum Aufstellen der Wasserbilanz

### **Abfluss**

- Ereignisanalyse: Dokumentation von Hochwasserabflussprozessen, wie z.B. Angaben zum regionalen Abflussbeiwert und der Dynamik des Gebietsverhaltens
- Regionalisierung statistischer Niederwasserkenngößen zur Beurteilung von Einleitungen, Vorfluterentnahmen etwa für die Bewässerung, Festlegung von Restwassermengen
- Regionalisierung statistischer Hochwasserkenngößen besonders für kleine Gebiete für die Ausweisung von Hochwasserrisikoflächen und für Bemessungszwecke
- Ermittlung von Modellparametern (z.B. Abflussbeiwert, Konzentrationszeit) in Gebieten ohne Abflussbeobachtungen als Grundlage für Abflussmodelle. Die Modelle dienen zur
  - Bemessung (z.B. Dimensionierung von Hochwasserentlastungsanlagen, den Flussbau und die Schutzwasserwirtschaft)
  - Prognose (Zivilschutz, Wasserkraftoptimierung)
  - Planung und Bewirtschaftung (z.B. die Abschätzung der Auswirkung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen bzw. Eingriffen wie kraftwerksbedingter Schwellbetrieb)
- Regionalisierung von Kenngrößen der Wasserqualität, Monitoring

### **Grundwasser**

- Regionalisierung der Grundwasserstände für Fragen der Bewirtschaftung; Analyse der Auswirkung von Entnahmen; Verstehen des Grundwasserströmungssystems
- Ermittlung von Modellparametern (z.B. hydraulische Durchlässigkeit) als Basis für die Grundwassermodellierung. Die Modelle dienen zur
  - Bewirtschaftung, z.B. nachhaltige Nutzung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung

- Abschätzung von Eingriffen, z.B. Gewässerregulierung und andere flussbauliche Maßnahmen, Abdichtung von Deponien in Hinblick auf Menge und Qualität
- Optimierung, z.B. Wasserhaltung von Baustellen, Sanierung von Altlasten, Abklärung von Schutzgebieten für die Trinkwasserversorgung
- Bestimmung der Grundwasserneubildung für abgeschlossene Grundwasserkörper, zur Erstellung der Wasserbilanz sowie für die Bewertung von Bewilligungen zur Grundwasserentnahme
- Regionalisierung von Kenngrößen der Wasserqualität, Monitoring

Bei allen Komponenten der Wasserbilanz ist die Planung von Messnetzen ein zentrales Thema. Dabei muss einerseits die Übertragung der gemessenen Information auf unbeobachtete Gebiete und andererseits die Interpolationsmöglichkeit für Zwischeneinzugsgebiete berücksichtigt werden. Dies gilt sowohl für die Einrichtung von Sondermessnetzen etwa für die Beweissicherung als auch für die langfristige Beobachtung des Wasserhaushaltes im Rahmen des Hydrographiegesetzes (bis 21. Dezember 2006) bzw. danach im Rahmen des Wasserrechtsgesetzes, das die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) auf nationaler Ebene umsetzt.

Mit der WRRL haben Messnetzplanung und Regionalisierung in der Tat an Aktualität gewonnen. Mit Art. 8 der WRRL werden die Mitgliedsstaaten verpflichtet, bis zum 22. Dezember 2006 Programme zur Überwachung des Zustandes der Oberflächengewässer, des Grundwassers und der Schutzgebiete einzurichten. Im Fall der Oberflächengewässer muss das Monitoring so erfolgen, dass daraus ein umfassender Überblick über den ökologischen und chemischen Zustand der Gewässer im Einzugsgebiet abgeleitet und Veränderungen - die auf Maßnahmenprogramme zurückgehen - verfolgt und bewertet werden können. Im Rahmen der Ist-Bestandsaufnahme zur WRRL wurden die Fließgewässer in Österreich in ca. 2600 Wasserkörper unterteilt (BMLFUW, 2005b), für die in Zukunft die quantitativen Qualitätskomponenten Abfluss- und Abflussdynamik für die Einstufung des ökologischen Zustandes festgelegt werden müssen. Die stehenden Gewässer wurden in ca. 60 Wasserkörper gegliedert, für die eine Beschreibung der Wasserstandsdynamik, der Wassererneuerung und der Verbindung zum Grundwasserkörper erforderlich wird.

## **5. Methoden der Regionalisierung**

### **5.1 Methodische Grundlagen**

Im folgenden werden die Beiträge des vorliegenden Tagungsbandes in den Gesamtzusammenhang der Aufgaben und Methoden der Regionalisierung gestellt. Die Zitate der Beiträge sind dabei durch Fettdruck hervorgehoben.

Die ersten Beiträge sind vorerst den methodischen Grundlagen der hydrologischen Regionalisierung gewidmet. Die mathematische Formulierung der Methoden spannt dabei ein Spektrum auf von der rein statistischen Übertragung der Kenngrößen im

Raum bis hin zur kausalen Beschreibung der zugrundeliegenden Prozesse (Blöschl, 2005). Am einen Ende des Spektrums steht die räumliche Interpolation der Kenngrößen, etwa mit Hilfe von geostatistischen Methoden (**Blöschl, 2006**). Kausale Information kann in vereinfachter Weise unter Verwendung von Hilfsvariablen einbezogen werden, wofür typischerweise Regressionen verwendet werden. Eine Alternative zur vereinfachten Beschreibung der Prozesse sind Ähnlichkeitsschlüsse, bei denen die Daten aus hydrologisch ähnlichen Gebieten übertragen werden. Am anderen Ende des Spektrums stehen Prozessmodelle, z.B. Grundwassermodelle, meteorologische Modelle, und prozessorientierte Abflussmodelle, durch die eine möglichst weitgehende Nachbildung der tatsächlich ablaufenden Vorgänge mit Hilfe der Grundgleichungen versucht wird.

Bei der Anwendung aller Methoden ist es zeitsparend, die Daten computergerecht aufzubereiten, und mit geeigneten Systemen zu verwalten und zu visualisieren. Da bei Fragen der Regionalisierung der Raumbezug im Vordergrund steht, sind dafür Geographische Informationssysteme (GIS) ein wichtiges Werkzeug. **Fürst (2006)** gibt einen Überblick über GIS Funktionen zur hydrologischen Regionalisierung, einschließlich der Interpolation und dem Ausweisen homogener Teilgebiete und diskutiert die Regionalisierung von Modellparametern im Zusammenhang mit GIS. Einen Überblick über die derzeitige Datensituation des Hydrographischen Dienstes in Österreich gibt **Müller (2006)**. Es werden Vorschläge zur Datenprüfung und Qualitätssicherung sowohl mittels rechnerischer Plausibilitätstests, als auch durch Visualisierung und manuellen Vergleich mit anderen Messgrößen gemacht. Die Kontrolle durch den Bearbeiter bzw. die Bearbeiterin wird dabei hervorgehoben.

Die weiteren Methoden der Regionalisierung sind nun den Komponenten des Wasserkreislaufes folgend gegliedert:

## 5.2 Niederschlag

Zur deterministischen Analyse und Modellierung von Hochwasserereignissen ist eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Niederschlagsdaten notwendig. Bei der Bestimmung von Extremniederschlägen, besonders solcher mit kurzer Dauer, ist das Fehlen von langen Zeitreihen und die geringe Anzahl von Stationen mit zeitlich hoch auflösenden Niederschlagsaufzeichnungen ein Problem. Bei der Ermittlung des Gebietsniederschlages als Teil der Wasserbilanz ist es schwierig, den Niederschlag in höheren Lagen abzuschätzen, da die meisten Stationen im Tal liegen. Der Beitrag von **Weilguni (2006)** befasst sich mit beiden Aspekten. Hervorgehoben wird dabei die räumliche Interpolation des Niederschlages zu einem bestimmten Zeitpunkt unter Verwendung von Zusatzinformation wie etwa Radarreflektivitäten und Topographie, sowie die Interpolation der Jahresniederschläge. Probleme bei der Anwendung von Radarniederschlägen zur Regionalisierung werden auch in Humer et al. (2006) diskutiert. Die Verwendung von Hüllkurven extremer Niederschläge wird in Merz (2006b) beschrieben. Bezüglich statistischer Kenngrößen von Extremniederschlägen sei auf Skoda und Lorenz (2003) sowie Lorenz und Skoda (2002) und die zu diesem

Thema im Hydrologischen Atlas von Österreich enthaltenen Karten (BMLFUW, 2005a) verwiesen.

### 5.3 Niederwasser und Hochwasser

Eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung von Trockenperioden ist der Q95 - Durchfluss, also jene Wassermenge, die an 95% aller Tage überschritten wird. Der Beitrag von **Laaha und Blöschl (2006)** beschreibt ein Verfahren zur flächendeckenden Bestimmung dieser Kenngröße in Österreich. Mittels eines regional differenzierten Regressionsmodells wurden Niederwasserspenden für unbeobachtete Einzugsgebiete ermittelt. Die vorliegenden Niederwasserstudien – die zumeist die statistischen Eigenschaften der Niederwasserkenngrößen berücksichtigen – wären zukünftig mit konzeptionellen Wasserbilanzmodellen zur Beschreibung und Prognose der Größe und Dauer von Niederwasserperioden zu kombinieren (Laaha et al., 2005). Eine Schwierigkeit in der Niederwasserforschung sind Instationaritäten in den Zeitreihen, das Fehlen von langen Zeitreihen sowie der offensichtlich im Vergleich zu anderen Beobachtungsgrößen der Hydrologie größere Fehler der beobachteten Niederwasserabflussdaten.

Eine der wesentlichen Aufgaben der Hydrographie Österreichs ist die Festlegung von Hochwasserkennwerten für Projekte der Schutzwasserwirtschaft. Dabei geht es vor allem um die Bestimmung von n-jährlichen Hochwasserdurchflüssen für unbeobachtete Gebiete und um die Extrapolation von Hochwasserdurchflüssen mit seltenen Auftretswahrscheinlichkeiten. **Merz (2006a)** gibt einen Überblick über Verfahren der Hochwasserregionalisierung und bewertet sie für österreichische Verhältnisse. Im Zuge des Projektes Hochwasserrisikozonierung Österreichs (HORA) wurden erstmals die Ergebnisse der Hochwasserstatistik nach einem einheitlichen Verfahren für ca. 25000 km Gewässerstrecken Österreichs regionalisiert. In einer intensiven Kooperation mit den Hydrographischen Diensten Österreichs wurden dabei die Eingangsdaten und das Ergebnis abgestimmt und in weiterer Folge der schutzwasserwirtschaftlichen Planung als Grundlage zur Verfügung gestellt. Über die damit gemachten Erfahrungen berichtet **Humer et al. (2006)**.

Einen Erfahrungsbericht für das Bundesland Kärnten gibt **Moser (2006)**. Es geht dabei um die Regionalisierung von Hochwasser- und Niederwasserspenden sowie um die Regionalisierung des Niederschlags. Auf die naturräumlichen Gegebenheiten in Kärnten, insbesondere die großen Unterschiede in den Reliefbedingungen, wird speziell eingegangen.

### 5.4 Ereigniskenngrößen

Eine wichtige hydrologische Kenngröße sind Ereignisabflussbeiwerte, da sie das Abflussvolumen bei gegebenem Niederschlag bestimmen. Für Pegeleinzugsgebiete können sie aus den Abflussdaten rückgerechnet werden. Ein Teilprojekt der Hochwasseranalyse Flood Risk des Lebensministeriums widmete sich der Analyse regionaler Ereignisabflussbeiwerte. Diese Arbeit lieferte Informationen zu den

regional äußerst unterschiedlichen Abflussbeiwerten in Österreich und damit eine Grundlage für die Anwendung von Niederschlags-Abflussmodellen. **Merz (2006b)** fasst die Ergebnisse dieses Projektes zusammen. Die Ergebnisse sind anwendbar für Gebiete, die nicht viel kleiner sind als die Pegeleinzugsgebiete. Für sehr kleine Gebiete ist es hingegen zielführender, Abflussbeiwerte aus Geländebegehungen abzuschätzen. **Markart et al. (2006)** präsentieren eine eigens für diesen Zweck entwickelte Anleitung, die auf Basis von zahlreichen Berechnungsversuchen entstanden ist. Der Schwerpunkt wird dabei auf kleine alpine Einzugsgebiete in Österreich gelegt. Neben der Ansprache der Bodenverhältnisse im Gelände werden Zeigerpflanzen zur Anschätzung des Abflussverhaltens verwendet. Die Regionalisierung anderer Ereigniskenngrößen wie der Konzentrationszeit werden in Merz (2006b) und Markart et al. (2006) ebenfalls kurz diskutiert.

## 5.5 Grundwasser

Die Hydrographischen Dienste Österreichs betreiben ein umfangreiches Messnetz zur Beobachtung der Grundwasserstände in Österreich. Auf Grundlage dieser Beobachtungen konnten Karten für den Hydrologischen Atlas von Österreich entwickelt werden, die u.a. die mittlere jährliche Schwankung des Grundwasserspiegels (Eybl et al., 2003) und Informationen zur Langzeitentwicklung des Grundwasserspiegels beschreiben (Blaschke, 2003). Diese Analysen waren auch die Basis der Istzustandsanalyse des mengenmäßigen Zustandes der Grundwasserkörper in Österreich mit Inkrafttreten der EU - Wasserrahmenrichtlinie.

Für die Analyse der lokalen Grundwassersituation zeigt **Blaschke (2006)** die Aussagekraft verschiedener Interpolationsmethoden. Dabei wird, wie in anderen Beiträgen dieses Tagungsbandes, der Verwendung von Zusatzinformation (wie etwa Geländedaten) bei der Regionalisierung ein großer Stellenwert zugeschrieben. An Hand von Beispielen zeigt Blaschke (2006) wie die geologische Situation und die daraus abgeleitete Abstraktion der Untergrundverhältnisse für die Bestimmung der Parameter von Grundwassermodellen herangezogen werden kann. Ein weiteres Beispiel sind Stofftransportmodelle zur Abschätzung der Ausbreitung von Pestiziden im Grundwasserkörper. Der Beitrag von **Scheidleder et al. (2006)** ist der Beurteilung der chemischen Grundwassergüte auf einer großräumigeren Skalenebene gewidmet. Scheidleder et al. (2006) berichten über ein EU Projekt, im Rahmen dessen eine Methode zur Berechnung von Gebietsmittelwerten von Grundwassergüteparametern entwickelt wurde. Ein wesentlicher Teil dieser Methode umfasste die Regionalisierung (Aggregation) von Einflussfaktoren unterschiedlichster Ebenen (Grundwasserkörper, Gemeinde- oder Messstellen-Ebene) auf die einheitliche Ebene der Grundwasserkörper, um zu einer regionalisierten Risikoaussage zu gelangen. Mehr als 150 Einfluss- und Risikofaktoren wurden in die Untersuchung einbezogen. Die Umsetzung der Methode im Zusammenhang mit der WRRL wird an Hand von Beispielen gezeigt.

## 5.6 Wasserrahmenrichtlinie

Da die Umsetzung der WRRL spezielle Anforderungen an die hydrologische Regionalisierung stellt, enthält die vorliegende Seminarpublikation zwei Beiträge zu diesem Thema. Auf die Vorgaben der WRRL im Zusammenhang mit dem Grundwasser ist der Beitrag von **Vollhofer und Samek (2006)** ausgerichtet. Es geht dabei um die flächendeckende Beschreibung des mengenmäßigen Zustandes von Grundwasserkörpern. Der Beitrag beschreibt wie im Rahmen der Bestandsanalyse die Entnahmen und die verfügbare Grundwasserressource ermittelt wurden. Dabei wurde die Grundwasserneubildung an Hand von Daten der Grundwasserstände und der Niederwasserabflüsse abgeschätzt. Im Rahmen der Bestandsanalyse wurden die Grundwasserkörper einem Dargebotstyp zugeordnet. Vollhofer und Samek (2006) geben Hinweise auf die in Hinblick auf die WRRL notwendigen Erweiterungen des Messnetzes. Zur weiteren Regionalisierung der Grundwasserneubildung für die ausgewiesenen Wasserkörper wird es vermutlich auch notwendig sein, deterministische Bodenwasserhaushaltsmodelle heranzuziehen. **Wimmer (2006)** beschreibt schließlich die Regionalisierung von wasserwirtschaftlichen Daten zur Abschätzung von Stofffrachten in Oberflächengewässern, ebenfalls auf die Vorgaben der WRRL eingehend. Der gute Gewässerzustand wird durch Umweltqualitätsnormen definiert, die bei der Bestandsanalyse und für den Fall von Abwassereinleitungen in Vorfluter von Interesse sind. Dabei wird die für die Anwendung der Umweltqualitätsnormen anzunehmende Bezugswasserführung sowie die Verdünnung bei Einleitungen diskutiert.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden ist einerseits eine Überprüfung der gegenwärtigen Messnetze auf deren Repräsentativität und Eignung notwendig und andererseits die Entwicklung bestehender Wasserbilanzmodelle zu einem einfach handhabbaren und in der Raum- und Zeitskala robusten Werkzeug anzustreben. Dabei ist sowohl dem Anspruch der WRRL gerecht zu werden, als auch die Möglichkeit zur Realisierung zu beachten, was pragmatische und fachlich vertretbare Lösungen auf Basis der bisher bereits geleisteten hydrologischen Regionalisierung in Österreich erfordert.

## 6. Literatur

Blaschke, A.P. (2003) Langzeitentwicklung der Grundwasserstände. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung. Kartentafel 6.3. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.

Blaschke, A. P. (2006) Regionalisierung bei ausgewählten grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 195-206

Blöschl, G. (2005) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080.

- Blöschl, G. (2006) Geostatistische Methoden bei der hydrologischen Regionalisierung. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 21-40.
- BMLFUW (ed.) (2005a) Hydrologischer Atlas Österreichs. 2. Lieferung. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-85437-250-7.
- BMLFUW (ed.) (2005b) EU Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG Österreichischer Bericht der IST – Bestandsaufnahme, Zusammenfassung der Ergebnisse für Österreich; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Emmenegger, C. (1990) Swiss National Hydrological and Geological Survey: Evolution of federal hydrometric network objectives and organisational structure – Economic and Social Benefits of Meteorological and Hydrological Services, WMO, S. 304-309.
- Eybl, J., G. Fuchs und J. Fürst (2003) Mittlere jährliche Schwankung des Grundwasserspiegels. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 1.Lieferung. Kartentafel 6.5. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.
- Fürst, J. (2006) Geographische Informationssysteme zur Unterstützung von Regionalisierungsaufgaben in der Hydrologie. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 41-54.
- Humer, G., A. Hochhold, W. Wührer und M. Hofer (2006) Hydrologische Regionalisierung – Erfahrungen eines Ingenieurbüros. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 131-142.
- Klink, H., H.P. Nachtnebel und J. Fürst (2005) Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 2. Lieferung. Kartentafel 7.1 Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-85437-250-7.
- Kresser, W. (1965) Österreichs Wasserbilanz, *Österreichische Wasserwirtschaft* 17, 213-221.
- Kresser, W. (1994) Wasserbilanz für das Österreichische Bundesgebiet 1961-90. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 72, 1-3.
- Laaha, G. und G. Blöschl (2006) Flächendeckende Bestimmung von Niederwasserkenngößen in Österreich. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 93-108.
- Laaha, G., G. Blöschl und J. Parajka (2005) Dem Spendenmuster auf der Spur - Bestimmung von Niederwasserkenngößen für Wasserkraftwerke und Wasserfassungen in Österreich, *VEÖ Journal*, DEZ/05, 2-4.
- Lauda, E. (1900) Die Hochwasserkatastrophe des Jahres 1899 im österreichischen Donaugebiete, Beiträge zur Hydrographie Österreichs, IV. Heft, k.k. hydrographisches

Central-Bureau, Wien.

Lorenz, P. und G. Skoda (2002) Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ( $D < 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Technische Universität Wien, pp. 179-199.

Markart, G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2006) Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen – Grundzüge und erste Erfahrungen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 159-178.

Merz, R. (2006a) Regionalisierung von statistischen Hochwasserkenngößen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 109-130.

Merz, R. (2006b) Regionalisierung von Ereigniskenngößen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 179-194.

Moser, J. (2006) Regionalisierung von hydrologischen Kennwerten in Kärnten. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 143-158.

Müller, G. (2006) Datenprüfung und –verfügbarkeit beim Hydrographischen Dienst in Wien. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 55-70.

Parajka J., R. Merz und G. Blöschl (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 57, 43-56.

Scheidleder, A., J. Grath, C. Schramm und S. Uhlig (2006) Regionalisierung von Grundwassergüteparametern. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 207-222.

Skoda G. und P. Lorenz (2003) Konvektive Starkniederschläge in 15, 60 und 180 Minuten. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung. Kartentafel 2.5-2.7. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.

Vollhofer, O. und M. Samek (2006) Regionalisierung wasserwirtschaftlicher Daten – Beschreibung des mengenmäßigen Zustandes von Grundwasserkörpern. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 223-238.

Weilguni, V. (2006) Regionalisierung des Niederschlags. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 71-92.

Wimmer, M. (2006) Regionalisierung von wasserwirtschaftlichen Daten zur Abschätzung von Stofffrachten in Oberflächengewässern. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 239-244.

Wundt, W. (1949) Die größten Abflussspenden in Abhängigkeit von der Fläche, *Die Wasserwirtschaft* 40, 59-64.

**Anschrift der Verfasser:**

MR Dipl.Ing. Reinhold Godina  
Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft,  
Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Wasserhaushalt  
(Hydrographisches Zentralbüro)  
Marxergasse 2, 1030 Wien  
Tel.: +43 01 711 00 6942 Fax: +43 01 711 00 6851  
E-mail: Reinhold.Godina@lebensministerium.at

Ao.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien  
Tel: +43 1 58801 22315 Fax: +43 1 58801 22399  
E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at



## **GEOSTATISTISCHE METHODEN BEI DER HYDROLOGISCHEN REGIONALISIERUNG**

Günter Blöschl

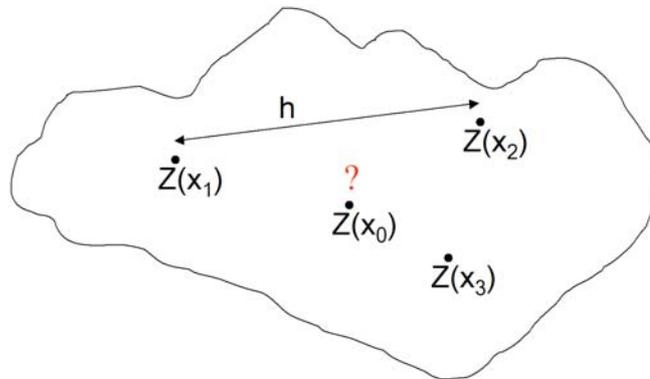
### **1. Einleitung**

Ein zentrales Problem der hydrologischen Regionalisierung besteht darin, aus Messungen einer Variablen an einigen Punkten die gleiche Variable an anderen Stellen des Gebietes abzuschätzen. Beispielsweise ist man interessiert, aus Punktmessungen des Grundwasserstandes in einem Aquifer die Grundwasserstände flächendeckend zu bestimmen. Andere hydrologische Variablen sind der Niederschlag, Abflusskenngrößen, Wasserqualitätsparameter aber auch die hydraulische Durchlässigkeit von Aquiferen und Bodendaten. Das vorliegende Seminar beschäftigt sich mit den Methoden, dieses Regionalisierungsproblem zu lösen. Eine bestimmte Methode, die Geostatistik, verwendet dafür die räumlichen Korrelationen der untersuchten Variable. Dabei wird angenommen, dass die zu interpolierende Variable eine Zufallsvariable ist, die durch eine statistische Verteilungsfunktion und andere statistische Kenngrößen bestimmt ist. Der gemessene Einzelwert wird als eine Realisation dieser Zufallsvariablen angesehen. Der interpolierte Wert wird als Schätzwert für die Zufallsvariable an jedem Ort bezeichnet. Statistisch stellt sich das Problem wie in Abb. 1 gezeigt dar. Bekannt sind die Messwerte der Zufallsvariablen  $Z$  an den Orten  $x_1, x_2, x_3$  etc. Gesucht ist der Schätzwert für die Zufallsvariable  $Z$  am Ort  $x_0$ . Durch Wiederholung der Schätzung bei Variation von  $x_0$ , erhält man eine flächendeckende Verteilung der untersuchten Variable.

Man unterscheidet nun zwei grundlegende Fragestellungen. Bei der ersten geht es darum, den besten Schätzwert der untersuchten Variablen an jedem Ort zu finden. Es handelt sich also um ein Interpolationsproblem. Bei der zweiten Fragestellung geht es darum, jenen Schätzwert an jedem Ort zu finden, der eine möglichst realistische räumliche Variabilität ergibt. Dieser unterscheidet sich vom ersteren wie in Kapitel 4 dieses Artikels dargestellt wird. Die dafür üblichen Methoden werden als stochastische Simulation bezeichnet. Beide Aufgabenstellungen bestehen aus zwei Schritten. Im ersten Schritt, der Variogrammanalyse, wird die räumliche Variabilität der untersuchten Variable mit Hilfe eines Variogramms quantifiziert. Im zweiten Schritt, der Interpolation bzw. Simulation werden, aufbauend auf dieses Variogramm, Werte der Variablen an Stellen ohne Messungen geschätzt.

Der vorliegende Artikel folgt diesen beiden Schritten. In Kapitel 2 wird die Variogrammanalyse dargestellt. Der Vorteil von geostatistischen Methoden im Vergleich zu anderen Ansätzen (z.B. Splines) besteht darin, dass die Varianzen gut interpretierbar sind. Die Glattheit der interpolierten Verteilung ergibt sich direkt aus dem Variogramm. Außerdem können Messfehler direkt im Variogramm berücksichtigt werden. Diese Vorteile stehen dem Nachteil gegenüber, dass die Bestimmung des Variogramms in der Hydrologie wegen der meist knappen Datensituation oft mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Diese werden in Kapitel 2 ausführlich

diskutiert. In Kapitel 3 werden Interpolationsverfahren beschrieben, im Kapitel 4 stochastische Simulationsverfahren. Eine kurze Darstellung der Standardsoftware zur geostatistischen Analyse, Interpolation und Simulation schließt diesen Artikel ab.



**Abb. 1:** Aufgabe von geostatistischen Methoden ist es, den Wert einer Variable  $Z$  am Ort  $x_0$  auf Basis von Messungen  $Z$  an den Orten  $x_i$  zu bestimmen.  $h$  ist die Distanz zwischen zwei Punkten.

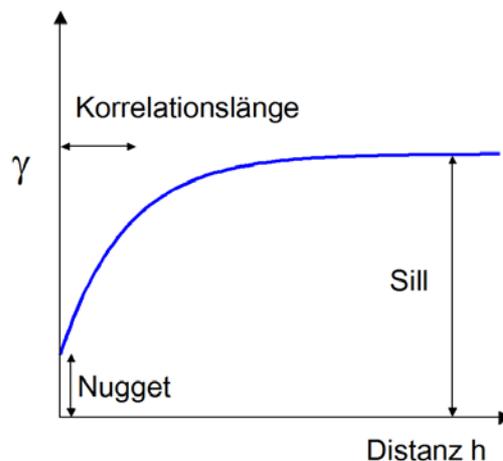
## 2. Räumliche Variabilität und Variogrammanalyse

### 2.1 Räumliche Variabilität

Bei der geostatistischen Methode wird die räumliche Variabilität der Zufallsvariablen durch die räumliche Varianz  $\gamma$  erfasst, die gegen die Distanz zweier beliebigen Punkte aufgetragen wird (Isaaks and Srivastava, 1989). Diese Beziehung wird als Variogramm bezeichnet. In Gl. 1 ist das Variogramm dargestellt, indem von zwei beliebigen Punkten mit Abstand  $h$  die Differenz gebildet wird, diese quadriert und dann der halbe Erwartungswert für bestimmte Abstände gebildet wird. Den Erwartungswert kann man sich ähnlich dem Mittelwert vorstellen.

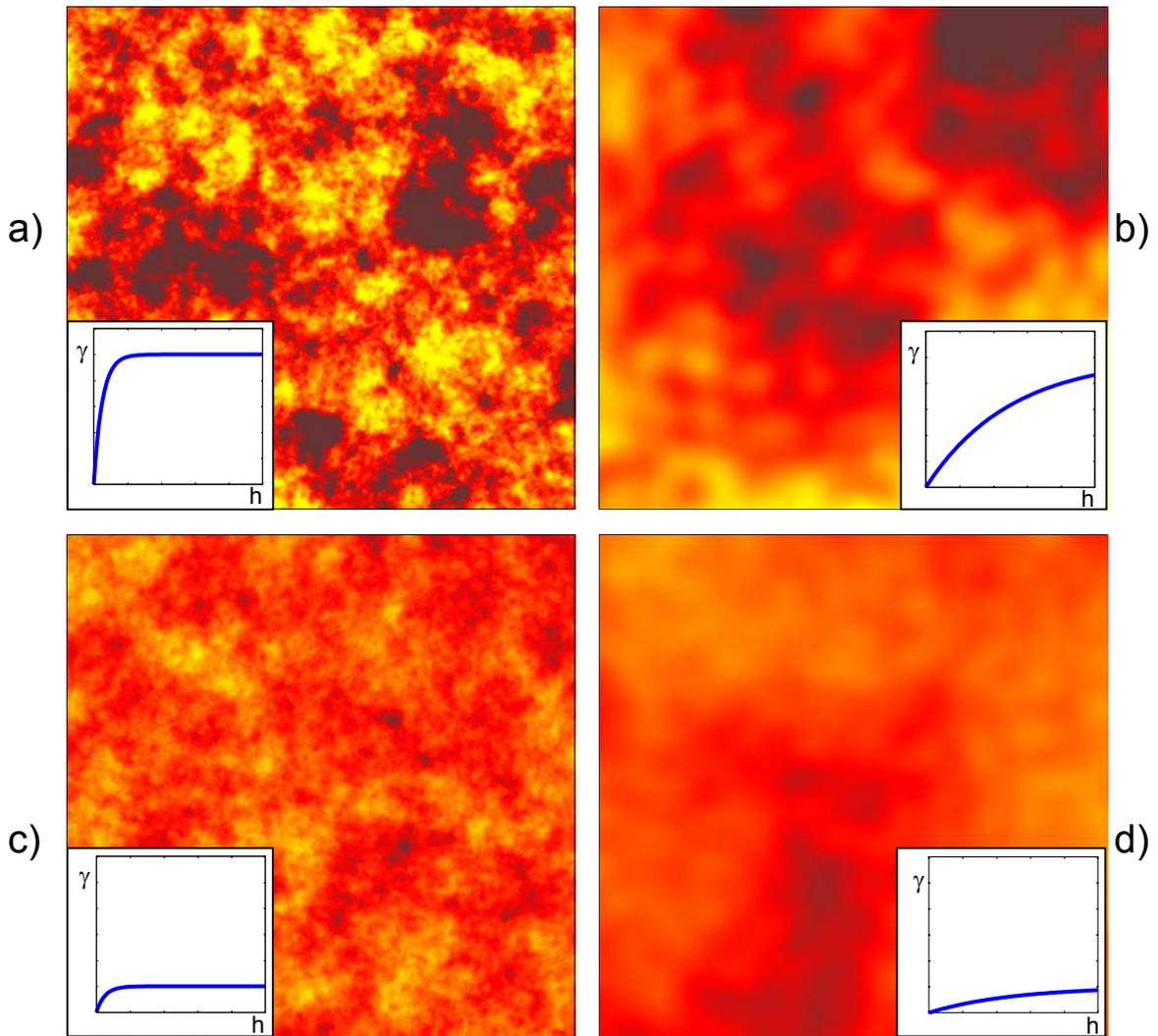
$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} \quad (1)$$

Sind benachbarte Wertepaare ähnlich, ist die quadrierte Differenz klein, somit ist auch  $\gamma$  klein. Die Werte dieser beiden Punkte sind gut korreliert. Mit zunehmendem Abstand der Punkte werden die Werte unähnlicher und  $\gamma$  wird größer. Ein typisches Variogramm ist in Abb. 2 gezeigt. Der Nugget ist die Varianz zweier Punkte mit einem sehr kleinen Abstand. Der Nugget kann als Messfehler interpretiert werden und als kleinräumige natürliche Variabilität auf Distanzen kleiner als der kleinste Abstand der Messwerte. Das Niveau des Variogramms (als sill bezeichnet) entspricht der Varianz der Variablen insgesamt. Je höher das Niveau, desto stärker variiert die Variable. Die Korrelationslänge beschreibt den Anstieg des Variogramms vom Nullpunkt. Je größer die Korrelationslänge, über desto größere Distanzen ist die Variable korreliert. Bei großer Korrelationslänge ist die Zufallsvariable räumlich glatter als bei kleiner. Das Zusammenspiel von Korrelationslänge und Varianz ist in Abb. 3 dargestellt.

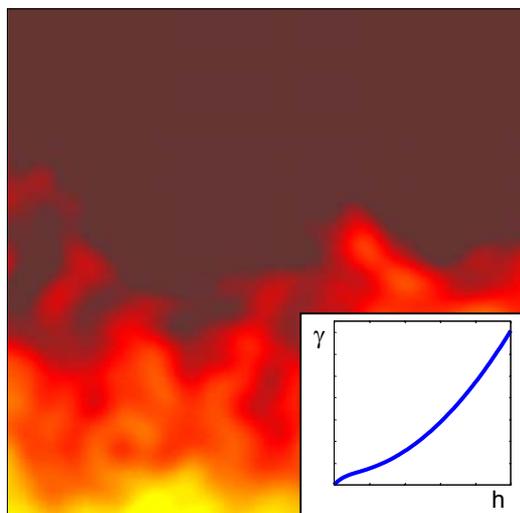


**Abb. 2:** Typisches Variogramm: Der Nugget ist der Variogrammwert für die Distanz  $h=0$ . Der Sill ist das Niveau des Variogramms, das der Varianz der Variablen entspricht. Die Korrelationslänge ist ein Maß für die Glattheit der räumlichen Verteilung der Variablen.

Die in Abb. 3 gezeigte Zufallsvariable ist stationär. Das bedeutet, dass bei einem beliebig großen Feld auf allen Seiten des Feldes die gleichen Werte der Zufallsvariablen zu erwarten sind. Tatsächlich treten aber auch Situationen auf, bei denen dies nicht der Fall ist. Bei Grundwasserständen, beispielsweise, liegt in der Regel ein Trend vor, d.h. am stromaufwärts und stromabwärts gelegenen Rand des Untersuchungsgebietes unterscheiden sich die Werte des Grundwasserspiegels systematisch (und nicht nur zufällig). Diese Situation ist in Abb. 4 dargestellt. Für das Variogramm bedeutet dies, dass es bei großen Distanzen kein horizontales Niveau erreicht, sondern weiter ansteigt (Abb. 4).



**Abb. 3:** Felder von Zufallsvariablen mit unterschiedlicher Varianz und Korrelationslänge mit zugehörigen Variogrammen: (a) große Varianz, kleine Korrelationslänge, (b) große Varianz, große Korrelationslänge; (c) kleine Varianz, kleine Korrelationslänge, (d) kleine Varianz, große Korrelationslänge. Hell: kleine Werte; Dunkel: große Werte.



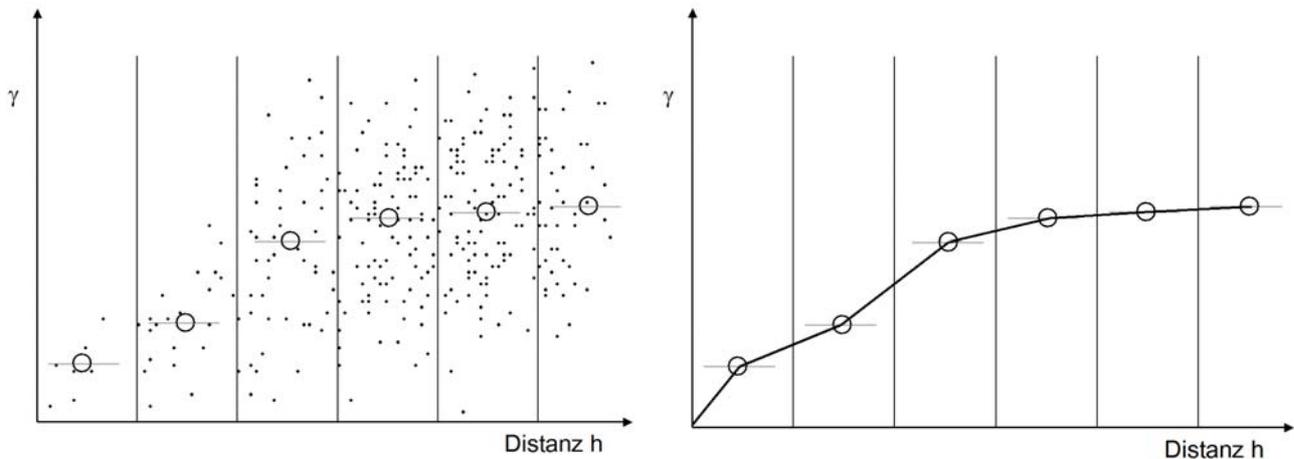
**Abb. 4:** Feld einer nicht stationären Zufallsvariablen mit zugehörigem Variogramm.

## 2.2 Schätzung des empirischen Variogramms aus Daten

Für eine konkrete Situation ist das in Gl. 1 und den Abb. 2-4 gezeigte Variogramm vorerst unbekannt. Es muss aus Daten bestimmt werden. Dafür wird zuerst ein Variogramm aus den Daten abgeleitet (empirisches Variogramm) und dann eine Ausgleichskurve angepasst (das sogenannte Variogrammmodell oder theoretisches Variogramm). Diese Anpassung entspricht der Schätzung der statistischen Eigenschaften der Grundgesamtheit (Variogrammmodell) aus den statistischen Eigenschaften der Stichprobe (aus den Daten bestimmtes, empirisches Variogramm). Für die Schätzung wird deshalb das für die Grundgesamtheit geltende Variogramm in Gl. 1 durch einen aus Daten bestimmten Schätzwert des Variogramms ersetzt. An Stelle des Erwartungswertes  $E\{\cdot\}$  in Gl. 1 tritt nun der Mittelwert  $\frac{1}{n} \sum \{\cdot\}$ :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\Delta h} \{ [Z_i - Z_j]^2 \} \quad (2)$$

Abb. 5 verdeutlicht diese Gleichung und zeigt die halben quadrierten Differenzen der Messwerte  $(Z_i - Z_j)^2$  jeweils eines Stationspaares ( $i$  und  $j$ ) aufgetragen gegen die räumliche Distanz  $h$  dieser beiden Stationen. Abb. 5 zeigt auch das Variogramm, das aus der Mittelung der  $(Z_i - Z_j)^2$  für bestimmte Distanzklassen mit der Breite  $\Delta h$  entsteht, wobei die Distanzklasse  $N$  Wertepaare enthält.



**Abb. 5:** Schätzung des empirischen Variogramms aus Daten. Punkte sind die halben quadratischen Differenzen der Variable an zwei Punkten, horizontale Linien sind deren Mittelwerte innerhalb jeder Distanzklasse.

## 2.3 Variogrammmodelle

Für das Variogrammmodell sind unterschiedliche Formen gebräuchlich. Ausgewählt wird die Form, die dem aus den Daten abgeleiteten Variogramm am besten entspricht oder nach Einschätzung des Hydrologen das Verhalten der Grundgesamtheit am besten widerspiegelt. Ein Beispiel für ein theoretisches Variogramm ist das sog. exponentielle Variogramm (siehe Abb. 6a):

$$\gamma(h) = \sigma_0^2 + (\sigma_\infty^2 - \sigma_0^2) \cdot (1 - e^{-h/\lambda}) \quad (3)$$

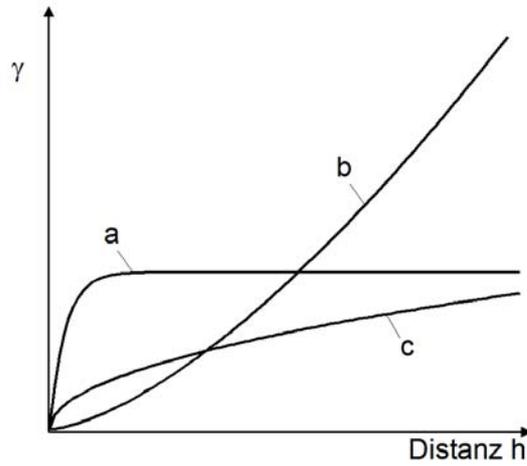
wobei  $\sigma_0^2$  der Nugget,  $\sigma_\infty^2$  der Sill, und  $\lambda$  die Korrelationslänge ist. Dieses Variogramm beschreibt eine stationäre Zufallsvariable wie in Abb. 2-3 gezeigt. Für Abb. 6a wurde der Nugget  $\sigma_0^2 = 0$  gesetzt. Bei  $\sigma_0^2 > 0$  wird die räumliche Verteilung weniger glatt, d.h. heterogener. Ein zweites häufig verwendetes Variogrammmodell ist das Potenzvariogramm:

$$\gamma(h) = \alpha \cdot h^\beta \quad (4)$$

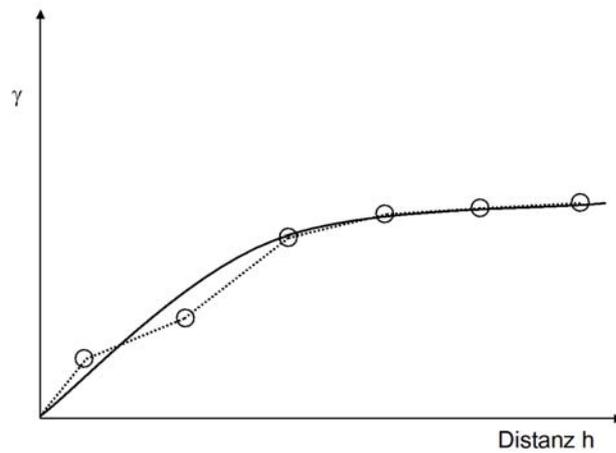
Der Exponent  $\beta$  gibt dabei die Krümmung des Variogramms an und muss  $< 2$  sein.

Die Parameter des Variogramms ( $\sigma_0^2$ ,  $\sigma_\infty^2$ ,  $\lambda$  bzw.  $\alpha$ ,  $\beta$ ) werden bestimmt, indem das Variogrammmodell (Gl. 3 bzw. 4) an das empirische Variogramm (Gl. 2) angepasst wird. Dabei werden die Parameter so lange variiert, bis eine gute Übereinstimmung des Variogrammmodells mit dem empirischen Variogramm erzielt wird (Abb. 7). Die Anpassung erfolgt in der Regel visuell durch Trial and Error. Dies besitzt den Vorteil, dass die Einschätzung des Hydrologen einfließen kann. Es sind auch automatische Verfahren üblich. Für eine erfolgreiche automatische Anpassung ist allerdings eine große Anzahl von Messstellen erforderlich. Abb. 8 zeigt als Beispiel das Ergebnis von Testrechnungen, bei denen das Zufallsfeld als bekannt angesehen wurde, numerisch Messwerte aus dem Feld gezogen wurden und daraus das Variogramm berechnet wurde. Dieser Vorgang wurde für verschiedene Zufallsfelder mit den gleichen statistischen Eigenschaften wiederholt. Das Ergebnis ist die geschätzte Korrelationslänge. Die Kreuze in den Abbildungen zeigen den Mittelwert der Testrechnungen. Theoretisch sollte die Korrelationslänge 1 sein, d.h. gleich dem Wert des angenommenen Zufallsfeldes. Tatsächlich bestimmen allerdings auch die Anzahl der Messwerte und deren räumliche Abstände die ermittelte Korrelationslänge. Sind nur 16 Messwerte vorhanden (Abb. 8 links), tritt ein systematischer Fehler auf (die Korrelationslänge wird bei großer Distanz der Messwerte überschätzt, Kreuze in Abb. 8) und die Streuung (vertikale Linien in Abb. 8) ist groß. Bei einer zunehmend größeren Anzahl von Messwerten nehmen der systematische Fehler und die Streuung ab. Allerdings sind über 1000 Messwerte erforderlich, um die Korrelationslänge genau zu bestimmen. Dies bedeutet, dass es für viele hydrologische Anwendungen günstig ist, die Experteneinschätzung über das zu erwartende hydrologische Verhalten der untersuchten Variable einfließen zu lassen.

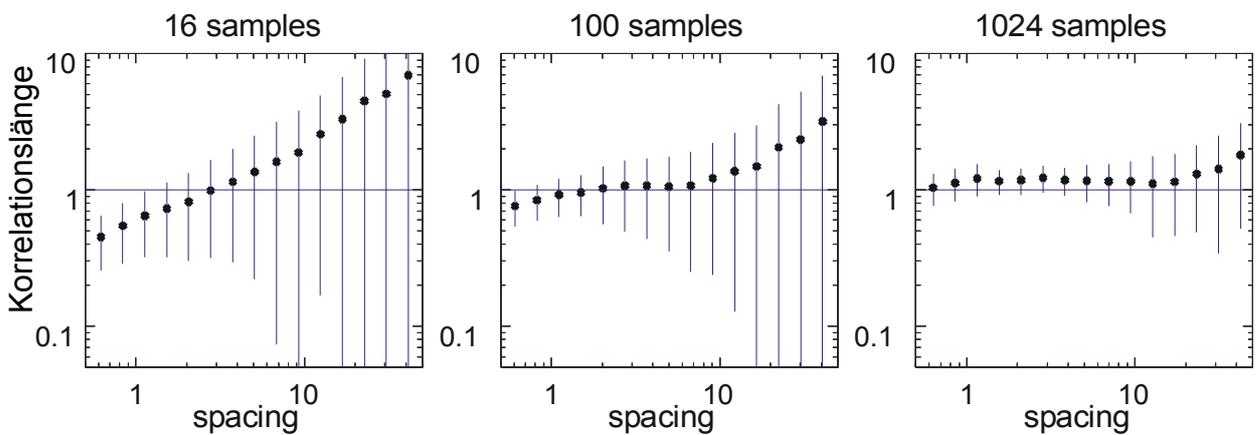
Die Variogrammmodelle in Gl. 3 und 4 geben den einfachsten Fall an, bei dem die Varianz nur von der Distanz abhängt. Eine Erweiterung besteht darin, dass die Varianz als richtungsabhängig angesehen wird. Es werden dann zwei Variogramme – in Nord-Süd und West-Ost Richtung – geschätzt.



**Abb. 6:** Typische Variogrammmodelle: (a) Exponentielles Variogramm; (b, c) Potenzvariogramm (b:  $\beta > 1$ ; c:  $\beta < 1$ ).



**Abb. 7:** Experimentelles Variogramm (punktirt) und angepasstes Variogrammmodell (durchgezogene Linie).



**Abb. 8:** Unsicherheit bei der Schätzung eines Variogrammmodells: Eingetragen ist die mittlere Korrelationslänge (Kreuze) berechnet aus 16, 100 bzw. 1024 Messwerten sowie deren Unsicherheit ausgedrückt als Standardabweichung (vertikale Linien). Spacing ist der mittlere Abstand der Messungen ausgedrückt als Vielfaches der Korrelationslänge des angenommenen Zufallsfeldes. Aus Skøien und Blöschl (2006).

### 3. Kriging

#### 3.1 Kriginginterpolation

Das so ermittelte theoretische Variogramm wird im nächsten Schritt für die räumliche Interpolation verwendet. Dafür stehen zahlreiche geostatistische Methoden zur Verfügung wie etwa Ordinary Kriging (Deutsch und Journel, 1997). Nahezu alle Methoden sind sogenannte "best linear unbiased estimators (BLUE)", also beste lineare Schätzmethoden ohne systematischen Fehler (bias). Sie sind beste Methoden in dem Sinne, dass der mittlere quadratische Fehler ein Minimum sein soll, d.h.

$$E\left[(\hat{Z}_0 - Z_0)^2\right] \rightarrow \min \quad (5)$$

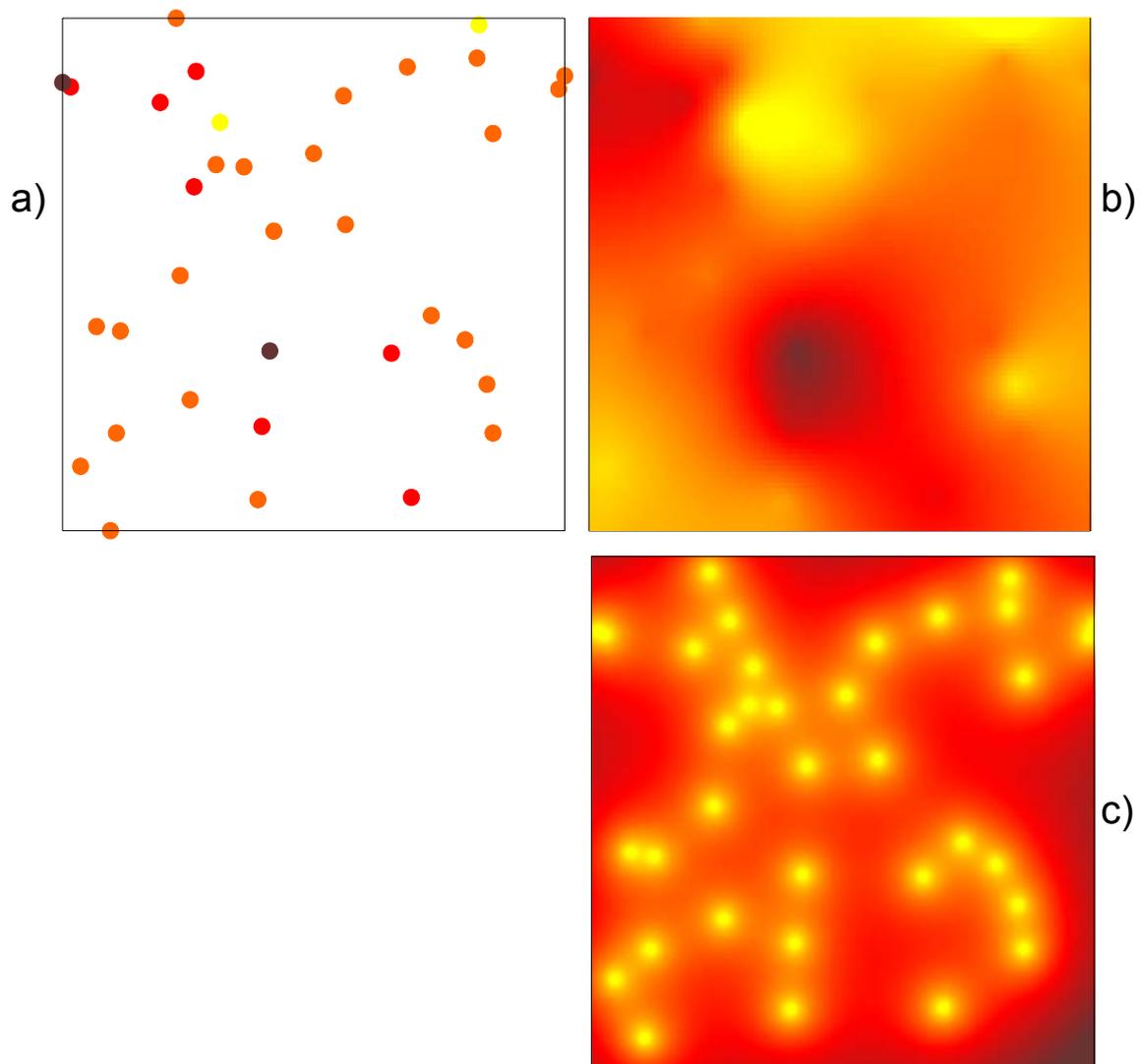
Sie sind linear Methoden, da angenommen wird, dass sich der zu interpolierende Wert  $\hat{Z}_0$  als gewichtetes Mittel (Linearkombination) der Messwerte  $Z_i$  darstellen lässt, d.h.

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{0,i} \cdot Z_i \quad (6)$$

Und sie haben keinen systematischen Fehler, da angenommen wird, dass der Erwartungswert des Fehlers Null ist, d.h.

$$E\left[(\hat{Z}_0 - Z_0)\right] = 0 \quad (7)$$

Gl. 5-6 erlauben es, ein lineares Gleichungssystem zu formulieren, bei dem die Gewichte  $\lambda_i$  die Unbekannten sind. Diese Gewichte sind eine Funktion der Lage der Messstationen sowie des Variogramms, sie sind aber nicht von den Messwerten selbst abhängig. Die Lösung des Gleichungssystems ergibt nun die  $\lambda_i$  für jeden zu interpolierenden Punkt  $x_0$  woraus sich der zu interpolierende Wert  $\hat{Z}(x_0)$  (hier abgekürzt als  $\hat{Z}_0$ ) berechnen lässt (Isaaks and Srivastava, 1989). Ein Beispiel für die Interpolation ist Abb. 9 zu entnehmen.



**Abb. 9:** Kriginginterpolation: (a) Messwerte; (b) Mittels Ordinary Kriging interpoliertes Feld; (c) Kriging-Schätzfehler, der ein Maß für die Unsicherheit der Interpolation ist. Hell: kleine Werte; Dunkel: große Werte.

Zusätzlich erlaubt die Kriginginterpolation das Ausweisen eines Schätzfehlers. Dieser Schätzfehler beschreibt die mit der räumlichen Interpolation verbundene Unsicherheit. Allerdings ergibt er sich, ähnlich wie die Gewichte  $\lambda_i$ , ausschließlich aus dem Variogramm und der Lage der Messpunkte. Deswegen ist die räumliche Verteilung des Schätzfehlers von der Lage der Messpunkte bestimmt (Abb. 9). Unsicherheiten bei der Ermittlung des Variogramms fließen nicht in diesen Schätzfehler ein. Zur Beschreibung solcher Unsicherheiten sind weiterführende Methoden (z.B. Kreuzvalidierung, Cressie, 1991) erforderlich.

### 3.2 Zusatzinformation

Falls eine große Anzahl von Messwerten vorliegt, die räumlich gut korreliert sind, können mit Ordinary Kriging und ähnlichen Methoden gute Ergebnisse erzielt werden. In der Hydrologie kommt es allerdings häufig vor, dass nur an wenigen Messpunkten

bzw. Stationen Daten vorliegen und diese nicht sehr gut korreliert sind. In anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass der mittlere Abstand der Messstellen bzw. Stationen groß ist im Vergleich zur Korrelationslänge der Zufallsvariablen. Dies ist der Fall in Abb. 8 bei einer kleinen Anzahl von Messwerten und großem Abstand (spacing). Die Regionalisierung in derartigen Situationen kann Methoden verwenden, die keine räumliche Korrelationen voraussetzen, z.B. deterministische Grundwassermodelle (Blaschke, 2006), sofern die dafür notwendigen Daten zur Verfügung stehen. Methoden im Zusammenhang mit der Abflussmodellierung sind in Blöschl (2005a) dargestellt. Soll dennoch mit geostatistischen Methoden regionalisiert werden, bietet es sich an, Zusatzinformationen heranzuziehen. Im Falle der Regionalisierung des Niederschlags könnte etwa als Zusatzinformation die Seehöhe verwendet werden.

Für die Hydrologie sind hier besonders zwei Typen von Interpolationsmethoden von Interesse. Die erste wird i.a. als Georegression bezeichnet und besteht darin, in einem ersten Schritt eine Regression der zu interpolierenden Größe (z.B. Niederschlag) mit einer Zusatzvariablen (z.B. Seehöhe) aufzustellen. Mittels der Regressionsgleichung wird dann für alle Punkte, an denen Zusatzinformation vorhanden ist, die hydrologische Größe (z.B. der Niederschlag) bestimmt. Dann werden die Residuen (Beobachtung minus der aus der Regression bestimmte Wert) räumlich interpoliert und hinzugezählt. Die Georegression wird z.B. für die räumliche Interpolation des Niederschlags verwendet, wenn eine Seehöhenabhängigkeit zu erwarten ist (siehe z.B. Goovaerts, 2000). Ein anderes Beispiel ist die Interpolation der Bodenfeuchte, wenn topographische Kenngrößen wie etwa der topographische Index oder Hangexposition als Zusatzinformation verwendet werden (z.B. Western et al., 1999).

Zu der zweiten Kategorie zählen verschiedene geostatistische Methoden, insbesondere External Drift Kriging und Cokriging, bei denen die Korrelationen zwischen der hydrologischen Größe und der Zusatzvariablen verwendet werden (z.B. Goovaerts, 2000). Während bei Cokriging die Korrelation zwischen der hydrologischen Größe und der Zusatzvariablen direkt durch ein Kovariogramm formuliert wird (z.B. Kupfersberger and Blöschl, 1995), wird bei External Drift Kriging angenommen, dass die Zusatzvariable perfekt mit der hydrologischen Größe korreliert ist. Dementsprechend wird bei External Drift Kriging die räumliche Struktur der Zusatzvariablen der interpolierten Fläche im Detail aufgeprägt. Ein Beispiel für die Verwendung von Zusatzinformation bei der Regionalisierung des mittleren Jahresniederschlags in Osttirol zeigt Abb. 5 in Weilguni (2006). Während die Regionalisierung der oberen Abbildung durch Verwendung von Kriging (ohne Zusatzinformation) entstand, wurde bei der unteren Abbildung die Seehöhe als Zusatzinformation für External Drift Kriging verwendet. Diese zeigt die Feinstruktur mit geringen Niederschlagswerten in den Tälern und großen Werten in den Hochlagen. Diese räumliche Struktur ist realistischer, als der ohne Zusatzinformation interpolierte Jahresniederschlag.

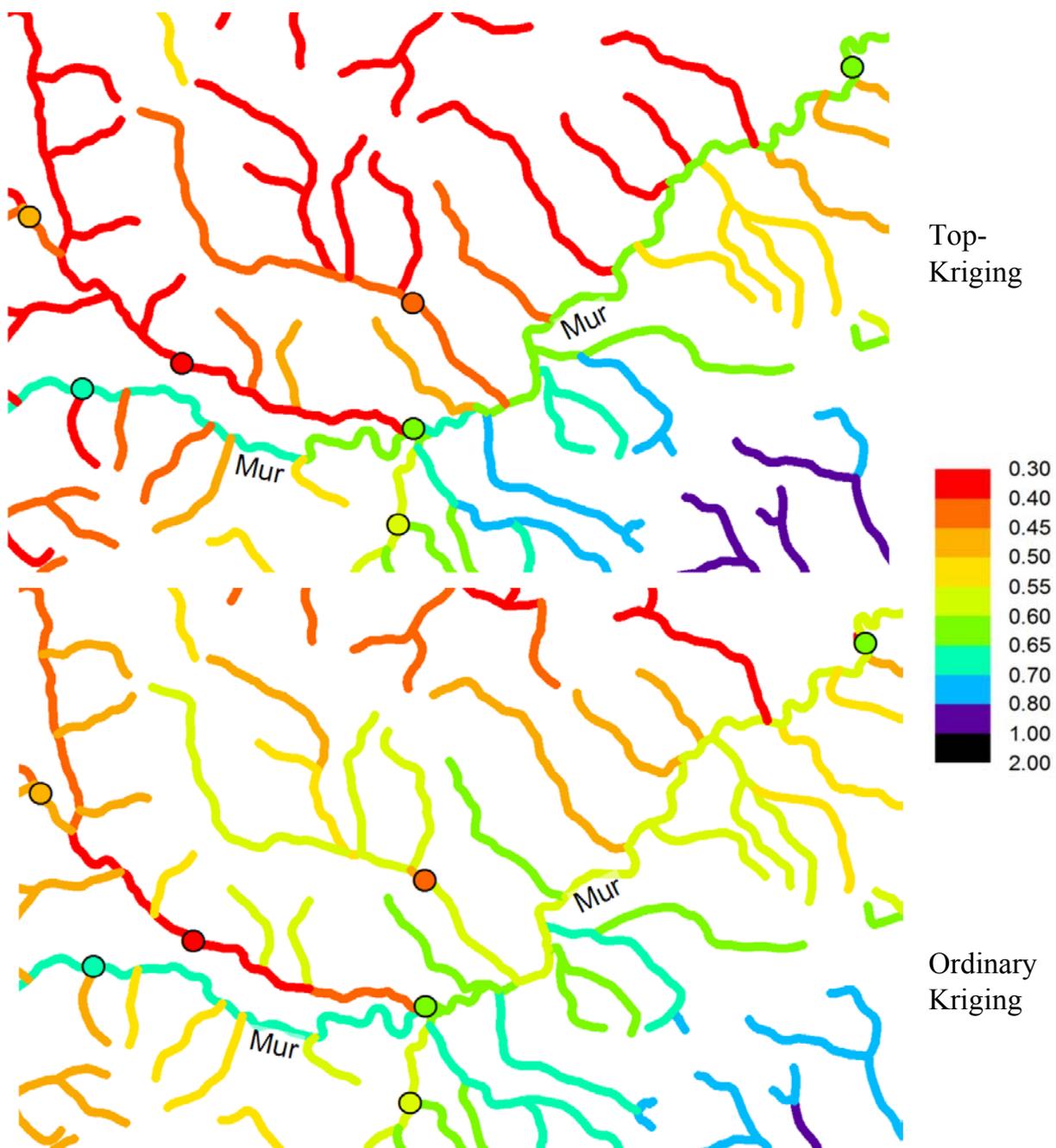
Entscheidend bei allen Interpolationsverfahren, die Zusatzinformationen verwenden, ist die geeignete Wahl der Zusatzvariablen. Während geeignete Variablen die

Interpolation verbessern, können ungeeignete Variablen die Interpolation sogar verschlechtern (siehe z.B. Blöschl and Grayson, 2000). Die Eignung lässt sich mittels Korrelationen und anderen statistischen Gegenüberstellungen prüfen. Auch Expertenwissen, das eine solche Eignung auf Basis des grundsätzlichen Verhaltens hydrologischer Größen einschätzt, ist geeignet. Beispiele sind der Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Geländeneigung oder der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und topographischen Indizes (Moore et al., 1991). Auch Größen, die mittels Fernerkundung bestimmt wurden, kommen als Zusatzvariablen in Frage (siehe z.B. Weilguni, 2006).

### 3.3 Topkriging

Für Variablen, die am Gewässernetz liegen, können Ordinary Kriging und ähnliche Methoden nicht gut angewendet werden. Das Problem besteht darin, dass die Distanz zwischen zwei Punkten  $h$  in Gl. 1 nicht dem Gewässernetz folgt, während genau dies für Kenngrößen des Gewässers (z.B. den mittleren Durchfluss) notwendig wäre. Skøien et al. (2006) entwickelten deshalb ein geostatistisches Verfahren, das auf der Gewässerstruktur aufbaut. Das Verfahren wird als Top-Kriging bezeichnet, da es die Relationen von Ober- und Unterliegern topologisch korrekt berücksichtigt. Stellen am gleichen Flusslauf werden dabei als ähnlicher angesehen, als Stellen die nicht am gleichen Flusslauf liegen, auch wenn sie die gleiche Distanz  $h$  aufweisen. Es wird angenommen, dass ein Punktvariogramm existiert, dieses wird über die Einzugsgebietsgrenzen integriert und daraus werden die Kriginggewichte  $\lambda_i$  berechnet. Das Punktvariogramm wird iterativ aus den Messungen rückgerechnet. Zur Anwendung des Verfahrens müssen das Gewässernetz und die Einzugsgebietsgrenzen digital vorliegen.

Ein Beispiel für die Anwendung von Top-Kriging zeigt Abb. 10 für die Regionalisierung von hundertjährlichen Hochwasserspenden im Murgebiet. Die Kreise zeigen die Spenden an den Pegeln, die als Messwerte angesehen werden. Die Gewässer sind mit den interpolierten Werten farbkodiert. Bei Ordinary-Kriging (Abb. 10 unten) werden die Mur und die Zubringer ähnlich behandelt. Bei Top-Kriging hingegen wird die Topologie berücksichtigt und die großen Messwerte an der Mur werden nur der Mur selbst zugewiesen. Die kleinen Messwerte an den nördlichen Zubringern werden nur den nördlichen Zubringern zugewiesen. Top-Kriging erlaubt es auch, die Unsicherheit bei der Regionalisierung zu schätzen (Skøien et al., 2006). Gegenüber anderen Verfahren, wie etwa Regressionen, besitzt Top-Kriging den Vorteil, dass die Werte der regionalisierten Flussstrecken, die unmittelbar an Pegel angrenzen, mit den Pegelwerten übereinstimmen.



**Abb. 10:** Regionalisierte Werte der normierten 100 jährlichen Hochwasserspende ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ ) der Mur bei Knittelfeld und Zubringer. Oben: Top-kriging; Unten: Ordinary Kriging. Kreise zeigen die Werte an den Pegeln. Aus Skøien et al. (2006).

## 4. Stochastische Simulation

### 4.1 Simulation und Interpolation

Während es bei der Interpolation, etwa mittels Kriging, darum geht, den besten Schätzwert der untersuchten Variablen an jedem Ort zu finden, geht es bei stochastischen Simulationen darum, jenen Schätzwert an jedem Ort zu finden, der eine möglichst realistische räumliche Variabilität ergibt. Das bedeutet, dass das Variogramm der Schätzwerte genau dem entsprechen soll, das für die Simulation verwendet wurde. Bei der Interpolation ist dies nicht der Fall. Die interpolierten Werte sind glatter als es dem zugrundeliegenden Zufallsfeld entspricht. Dementsprechend besitzen Variogramme, die aus dem interpolierten Zufallsfeld bestimmt werden, eine zu kleine Varianz (sill) und eine zu große Korrelationslänge. Deshalb wurden stochastische Simulationsverfahren entwickelt. Diese werden vor allem in der Grundwassermodellierung für die Generierung von Untergrundparametern verwendet, da es hier besonders darauf ankommt, die räumliche Struktur realistisch zu beschreiben (Schafmeister, 1999). Auch in anderen Gebieten der Hydrologie (etwa bei der Niederschlagsmodellierung) werden zunehmend stochastische Simulationsmethoden verwendet (Blöschl, 2005b).

Stochastische Simulationen ergeben nicht den besten Schätzwert an jedem Ort sondern eine mögliche Verteilung, die als Realisation bezeichnet wird. Unendlich viele Realisationen sind möglich, die unterschiedliche räumliche Muster aufweisen, aber dem gleichen Variogramm entsprechen. Jede Realisation ist gleich wahrscheinlich. Nun lassen sich zwei Fälle unterscheiden. Im ersten Fall geben die Realisationen lediglich die räumliche Variabilität wieder. Dies wird als nicht konditionierte Simulation bezeichnet. Im zweiten Fall werden zusätzlich die Werte der Messungen an den Messstellen wiedergegeben. Dies wird als konditionierte Simulation bezeichnet, d.h. die Realisationen sind an den Messungen konditioniert.

### 4.2 Nicht konditionierte Simulation

Die klassische Methode der nicht konditionierten stochastischen Simulation ist die Turning Bands Methode (Mantoglou and Wilson, 1981) Dabei wird im spektralen Raum eine ein-dimensionale Zufallsvariable generiert. Diese Zufallsvariable besitzt eine vorgegebene räumliche Korrelation, die in der Methode durch das Leistungsspektrum beschrieben wird, das äquivalente Information wie das Variogramm enthält. Diese ein-dimensionale Realisation wird in unterschiedlichen Richtungen im Raum wiederholt, z.B. in 16 verschiedenen Richtungen. Die ein-dimensionalen Realisationen werden als Bänder bezeichnet, deshalb die Bezeichnung Turning Bands. Nun werden die Werte aller ein-dimensionalen Realisationen auf die Fläche projiziert, wodurch eine flächige Verteilung der Variablen entsteht. Abb. 2-4 wurden mit der Turning Bands Methode generiert. Auch drei-dimensionale Simulationen sind mit dieser Methode möglich.

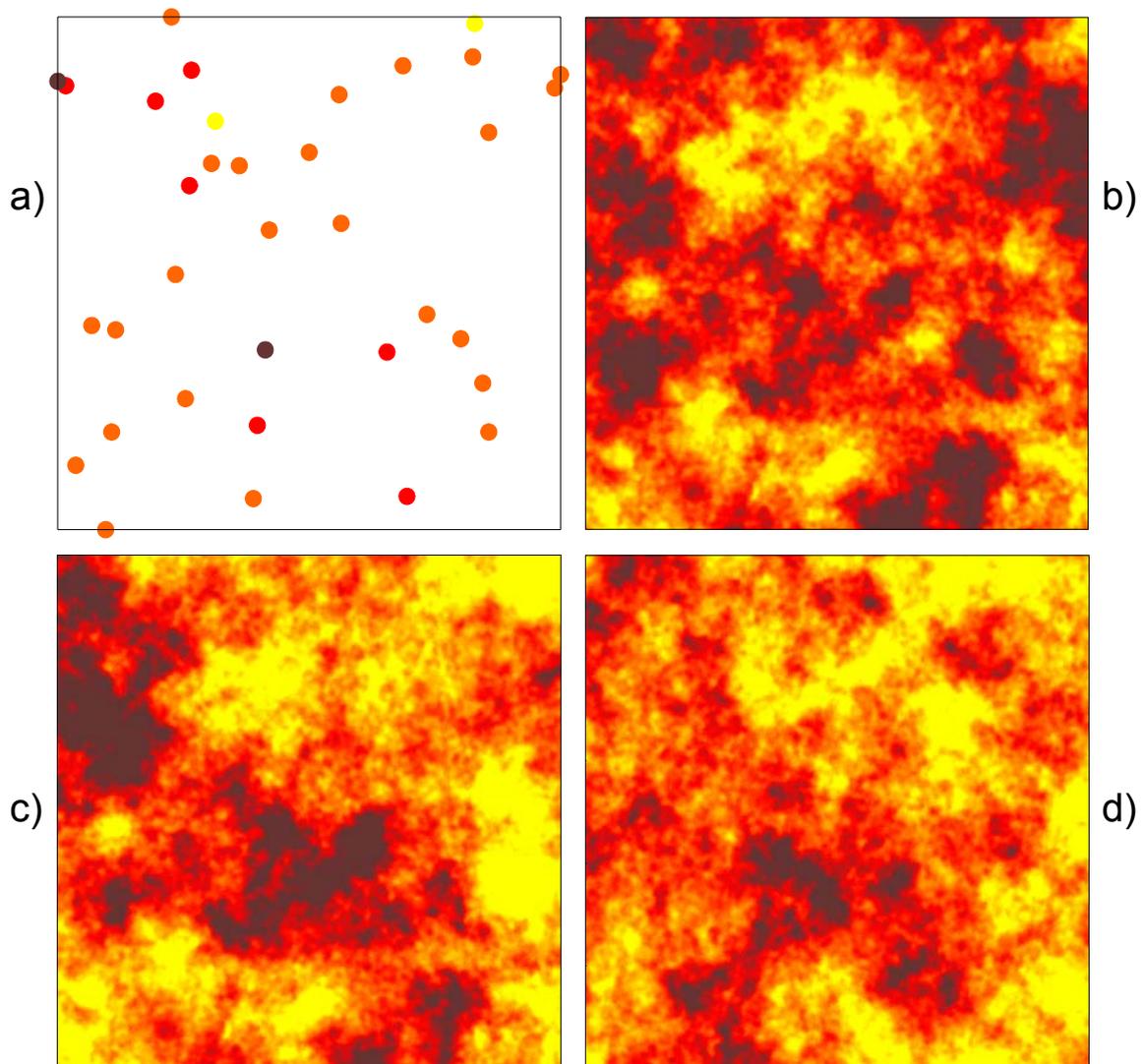
Eine Alternative bietet die Sequentielle Simulation (Deutsch und Journel, 1997). Dabei wird an einem beliebigen Punkt ein erster Zufallswert festgelegt, der einer vorgegebenen Verteilungsfunktion entspricht. Der zweite Wert an einem anderen Punkt wird nun gewählt unter Beachtung der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable am ersten Punkt den gewählten Wert besitzt. Der dritte und alle weiteren Werte werden in analoger Weise gewählt. Die bedingte Wahrscheinlichkeit ist der Mechanismus für die Berücksichtigung der vorgegebenen Variogrammstruktur. Der Vorteil der Sequentiellen Simulation besteht darin, dass auch Verteilungen mit komplizierten Variogrammstrukturen generiert werden können. Beispielsweise können unterschiedliche Variogramme für unterschiedliche Bereiche der Variablen angesetzt werden, z.B. kürzer Korrelationslängen für größere Werte (siehe z.B. Abb. 3.2.5 in Blöschl, 1996). Die räumliche Verteilung kann dann etwa mit Hilfe der Sequentiellen Indikator Simulation erzeugt werden (Deutsch und Journel, 1997).

### **4.3 Konditionierte Simulation**

Bei der konditionierten Simulation stimmen die generierten Werte an den Messstellen mit den Messungen überein. Die konzeptuell einfachste Möglichkeit besteht darin, die Kriginginterpolation mit nicht konditionierter Simulation zu kombinieren. Vorerst wird ein Zufallfeld mit Methoden der nicht konditionierten Simulation erzeugt. Dann wird für jede Messstelle die Differenz zwischen dem Messwert und dem Wert des Zufallfeldes an dieser Messstelle gebildet. Diese Differenzen werden räumlich interpoliert. Das so ermittelte räumliche Feld wird nun zu dem nicht konditionierten Zufallfeld addiert. Ein Beispiel für eine so generierte konditionierte Simulation zeigt Abb. 11c. Alternativ können Sequentielle Simulationsmethoden eingesetzt werden. Dabei wird eine analoge Vorgangsweise wie im nicht konditionierten Fall gewählt. Allerdings werden statt der ersten generierten Punkte die Messwerte übernommen. Alle weiteren Werte werden dann unter Verwendung der bedingten Wahrscheinlichkeit der bereits vorhandenen Werte (einschließlich der Messwerte generiert). Die Ergebnisse der beiden hier angeführten Methoden sind ähnlich.

Abb. 11 zeigt die konditioniert und nicht konditionierte Simulation in Vergleich. Die simulierte räumliche Struktur entspricht viel eher der wahren Struktur (Abb. 11d) als die Kriginginterpolation der gleichen Messwerte (Abb. 9b). Das grobskalige Muster der konditionierten Simulation entspricht dabei den Messwerten, das der nicht konditionierten Simulation hingegen nicht.

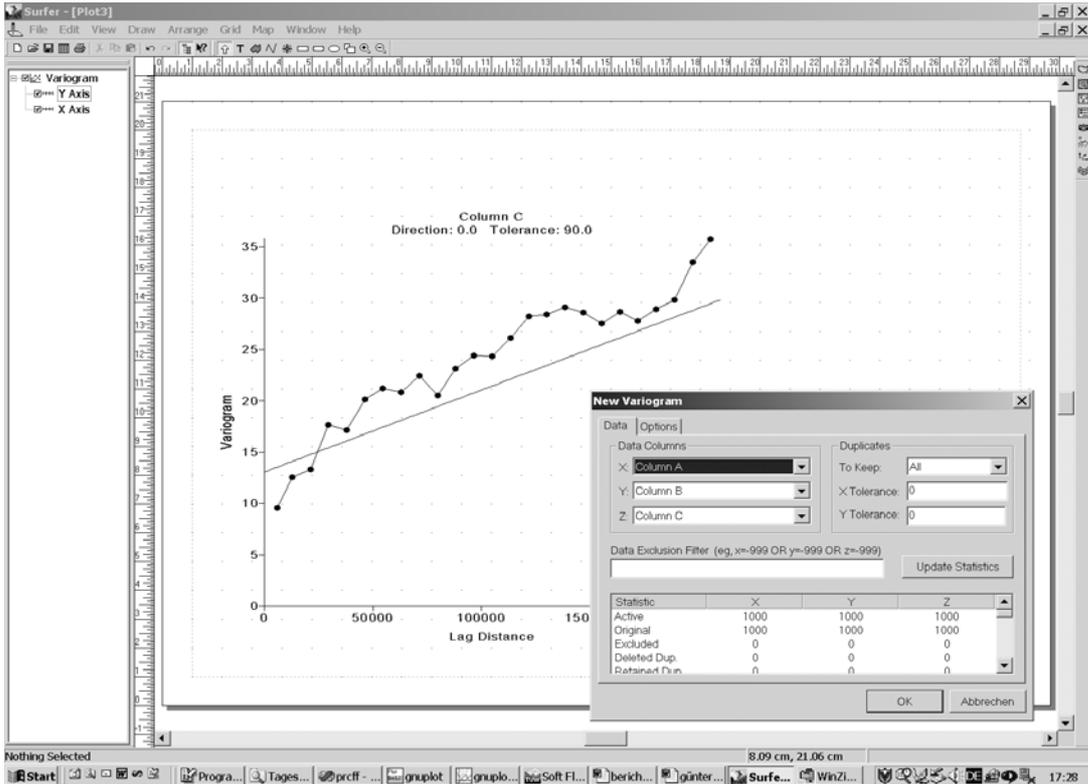
Weiterführende geostatistische Simulationsmethoden, mit einem Schwerpunkt auf der Grundwasserhydrologie, sind in Koltermann and Gorelick (1996) enthalten. Methoden im Zusammenhang mit der Disaggregation von Messwerten (downscaling) sind in Blöschl (2005b) beschrieben. Neue Arbeiten versuchen vor allem die räumliche Konnektivität, d.h. das Vorliegen bevorzugter Wasserwegigkeiten im Untergrund, zu berücksichtigen (z.B. Knudby and Carrera, 2005).



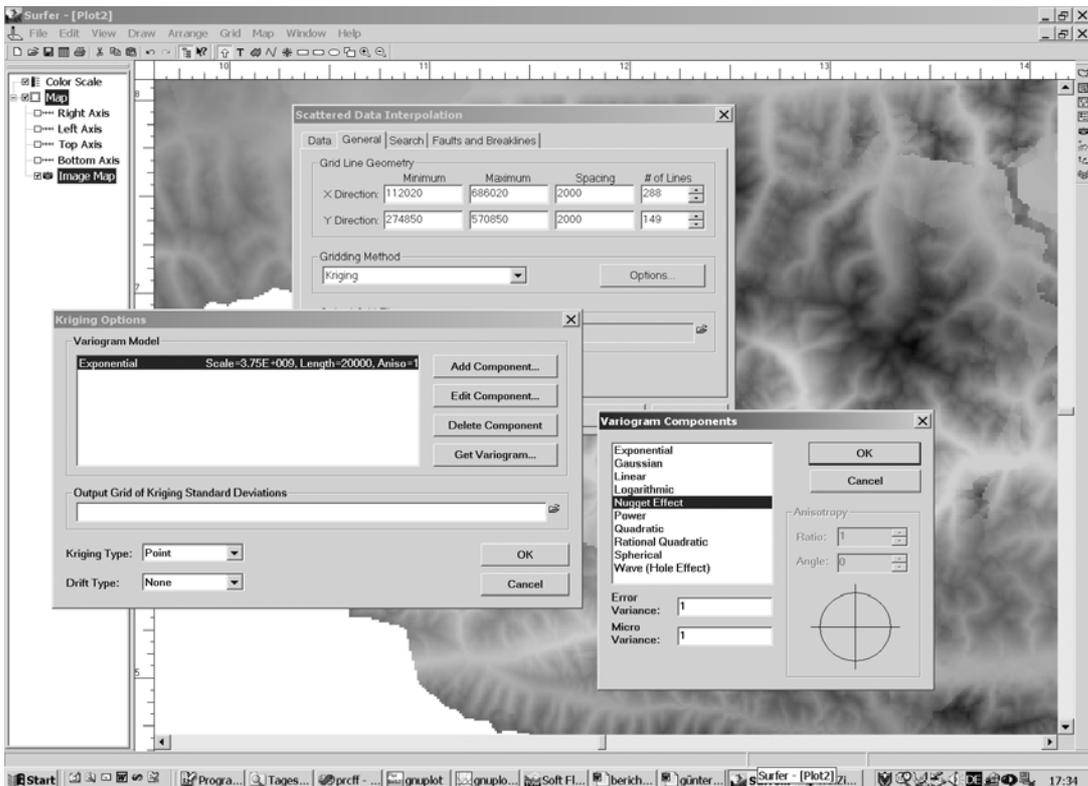
**Abb. 11:** Stochastische Simulationen: (a) Messwerte; (b) Nicht konditionierte Simulation; (c) Konditionierte Simulation; (d) Wahre Verteilung.

## 5. Software

Für die geostatistische Regionalisierung hydrologischer Größen mit und ohne Zusatzinformationen stehen zahlreiche Softwarepakete zur Verfügung. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl der derzeit erhältlichen Softwarepakete. Ein Beispiel der Softwareoberfläche von SURFER zeigt Abb. 12. Weiterführende Literatur zur geostatistischen Regionalisierung ist auf [www.ai-geostats.org/books/index.htm](http://www.ai-geostats.org/books/index.htm) zu finden.



a)



b)

Abb. 12: Beispiel einer Anwendungssoftware für die räumliche Interpolation: SURFER von Golden Software. Aus Blöschl und Merz (2002)

**Tab. 1:** Auswahl geostatistischer Software laut Internetrecherche vom 25.4.2006.

Name	GSLIB/ WinGslib	GSTAT	S-GeMS	SURFER V8	ArcGIS Geostatistical Analyst (GA)	GEOPACK	ISATIS
Variogramme	X	X	X	X	X	X	X
Kriging Interpolation	X	X	X	X	X	X	X
Zusatzinformation	X	X	X	-	-	X	X
Stochastische Simulation	X	X	X	-	-	-	X
Schnittstellen zu GIS	X	X	X	X	X	-	X
Open Source	X	X	X	-	-	-	-
Preis Rechenroutinen	gratis	gratis	gratis	s.u.	s.u.	gratis	s.u.
Preis Benutzer- oberfläche	\$250	gratis	gratis	\$599	\$2500 (nur GA)	-	auf Anfrage
Vorraussetzungen	-	Optional auch als R und S-Plus Erweiterung	-	-	ArcView oder ArcEditor	-	-
http://	www.gslib.com	www.gstat.org	sgems. sourceforge.net	www.golden software.com	www.esri.com	www.epa.gov	www. geovariances.com
Literatur	Deutsch und Journal (1997)	Pebesma (2004)					
Anmerkungen	Standard- software für anspruchsvolle Anwendungen	Standard- software für anspruchsvolle Anwendungen	Neue Software für anspruchsvolle Anwendungen	Integriert in GIS Funktionalität	Integriert in GIS Funktionalität	DOS basiert	Mächtiges Softwarepaket für Bergbau und Ölexploration

## 6. Danksagung

Herrn DI Jon Skøien wird herzlich für die Anfertigung der Abbildungen gedankt.

## 7. Literatur

Blaschke, A. P. (2006) Regionalisierung bei ausgewählten grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 195-206.

Blöschl, G. (1996) Scale and Scaling in Hydrology (Habilitationsschrift). Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 132. Technischen Universität Wien. 346pp.

Blöschl, G. (2005a) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080.

Blöschl, G. (2005b) Statistical upscaling and downscaling in hydrology. Article 9 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 135-154.

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

Blöschl, G. und R. Merz (2002) Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164, Technische Universität Wien, pp. 149-178.

Cressie, N. (1991) Statistics for spatial data, Wiley, New York, NY.

Deutsch, C. V. and A. G. Journel (1997) GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York, Oxford, 384 pp.

Goovaerts P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *J. Hydrol.* 228, 113-129.

Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava (1989) An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 pp.

Knudby, C. and J. Carrera (2005) On the relationship between indicators of geostatistical, flow and transport connectivity, *Adv. Water Resour.* 28, 405–421.

Koltermann, C. E. and S. M. Gorelick (1996) Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches, *Water Resour. Res.* 32, 2617-2658.

Kupfersberger, H. and G. Blöschl (1995) Estimating aquifer transmissivities - on the value of auxiliary data, *J. Hydrol.* 165, 85-99.

- Mantoglou, A. and J. L. Wilson (1981) Simulation of random fields with the turning bands method. Report no. 264, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 199pp.
- Moore, I. D., R. B. Grayson and A. R. Ladson (1991) Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrol. Processes* 5, 3-30.
- Pebesma, E.J. (2004) Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences* 30, 683-691.
- Schafmeister, M.-T. (1999) Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. Springer, Berlin, 172 pp.
- Skøien J. and G. Blöschl (2006) Sampling scale effects in random fields and implications for environmental monitoring, *Env. Monit. Assess.* DOI: 10.1007/s10661-006-4939-z.
- Skøien, J., R. Merz and G. Blöschl (2006) Top-kriging - geostatistics on stream networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 277–287.
- Weilguni, V. (2006) Regionalisierung des Niederschlags. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 71-92.
- Western, A.W., R. B. Grayson, G. Blöschl, G. R. Willgoose and T. A. McMahon (1999) Observed spatial organisation of soil moisture and its relation to terrain indices, *Water Resour. Res.* 35, 797-810.

**Anschrift des Verfassers:**

Ao.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien  
Tel: +43 1 58801 22315 Fax: +43 1 58801 22399  
E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at



# **GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSSYSTEME ZUR UNTERSTÜTZUNG VON REGIONALISIERUNGSAUFGABEN IN DER HYDROLOGIE**

Josef Fürst

## **1. Einleitung**

Geographische Informationssysteme (GIS) wurden zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Darstellung raumbezogener Information entwickelt. Raumbezogene Informationen beschreiben Aspekte der Umwelt im Hinblick auf

- die Lage in Bezug auf ein Koordinatensystem,
- die räumlichen Beziehungen von Objekten untereinander (Topologie), wie z.B. Nachbarschaftsbeziehungen und
- Eigenschaften wie Grundwasserstand, Nutzungsart, Schadstoffkonzentration, etc.

Für viele Aufgaben der Wasserwirtschaft ist es notwendig, hydrologische Kenngrößen für Gebiete oder Standorte zu bestimmen für die keine direkten Messungen vorliegen. Unter Verwendung von Messungen in der Nähe und regionaler Übertragung, also durch „Regionalisierung“, können solche Kenngrößen abgeleitet werden. Bereits aus dieser knappen Beschreibung des Begriffes geht hervor, dass die Lösung von Regionalisierungsaufgaben die Einbeziehung von umfangreichen raumbezogenen Daten und die Analyse mitunter komplexer Zusammenhänge zwischen diesen Daten und den gewünschten Kenngrößen erfordert. Die Unterstützung hydrologischer Regionalisierungsaufgaben mit GIS liegt daher nahe.

Hydrologische Regionalisierung bedeutet nach Kleeberg und Cemus (1992) zunächst die Darstellung der räumlichen Variabilität (oder als Spezialfall auch der Homogenität) von Parametern, Eingangsgrößen, Randbedingungen und Koeffizienten hydrologischer Modelle und schließt u. a. folgende Anwendungen ein (modifiziert nach Kleeberg und Cemus, 1992):

- Glättung räumlicher Verteilungen,
- Ausweisung homogener Teilgebiete,
- Übertragung von Punktinformationen innerhalb eines Gebietes auf die Fläche,
- Übertragung von Punktinformationen aus einem Gebiet auf Punkte eines anderen Gebietes,
- Änderung von Modellparametern bei der Übertragung vom Punkt auf den Raum,
- Abhängigkeit von Modellparametern von gebietsspezifischen Merkmalen,
- Datenbanken, Informations- und Wissenssysteme,
- Archivierung und Nutzung räumlich hoch aufgelöster Informationen

- Darstellung (Visualisierung) von Feldern hydrologischer Parameter und Daten.

Es ist unschwer erkennbar, dass für die meisten dieser Aufgaben entweder direkt entsprechende GIS-Funktionen vorliegen, geeignete Prozeduren effizient in GIS implementiert werden können, oder dass zumindest die Erfassung, Bereitstellung und Visualisierung der Daten für komplexere Lösungen mit speziellen hydrologischen Modellansätzen gut durch GIS unterstützt werden kann.

Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen gibt dieser Beitrag einen Überblick über elementare GIS-Funktionen zur hydrologischen Regionalisierung und stellt GIS-Aspekte wichtiger Regionalisierungsaufgaben anhand ausgewählter Beispiele dar.

## 2. Grundlage: Datenstrukturen

Die Geo-Informatik verwendet im Wesentlichen zwei gegensätzliche Konzepte, um den Raum zu beschreiben:

- als Ansammlung von eindeutig definierten und begrenzten Objekten (Entitäten), die durch ihre Eigenschaften beschrieben werden und deren Lage im Raum durch ein Koordinatensystem identifiziert ist, oder
- als kontinuierlich veränderliches Feld ohne erkennbare Grenzen.

In der Hydrologie finden beide Konzepte Anwendung. Karten der Messnetze, der Bodentypen, der Bodenbedeckung, der Hydrogeologie oder der Fließgewässer und Einzugsgebiete werden üblicherweise als Entitäten in einem Vektor-GIS abgebildet. Dagegen werden hydrometeorologische Variablen wie Niederschlag, Grundwasserstand, Geländehöhe oder Lufttemperatur für ein Untersuchungsgebiet im Allgemeinen als kontinuierliche Felder modelliert, die als Raster oder TIN-Datenstrukturen (unregelmäßige Dreiecksnetze, Triangulated Irregular Networks) abgebildet werden.

Die Verwendung des Entitätenkonzeptes hat zur Folge, dass eine eventuell vorhandene räumliche Variabilität innerhalb einer Entität, also z. B. innerhalb einer als „Auboden“ ausgewiesenen Bodenfläche, in den Daten nicht abgebildet ist und dass ein scharfer, stufenförmiger Übergang zur benachbarten Kategorie angenommen wird. Eigenschaften, die für eine Entität angegeben sind, gelten konstant für deren gesamte räumliche Ausdehnung.

Sowohl Raster als auch TIN sind diskrete Näherungen für kontinuierliche Felder. Wenn ihre Verwendung in numerischen Modellen mathematische Operationen erfordert, die die Kontinuität voraussetzen (z. B. Differenzieren), ist sorgfältig auf die Abstimmung der räumlichen Diskretisierung zwischen numerischem Modell und GIS-Datensatz zu achten.

Die Abbildung der hydrologisch relevanten Eigenschaften eines Gebietes erfolgt in den meisten GIS als Folge einzelner Datenschichten (Layers) in denen jeweils nur Entitäten gleichen Typs zusammengefasst sind (auch Rasterkarten). Eine Beziehung zwischen den Datenschichten ist nur durch das gemeinsame Koordinatensystem

herstellbar. Um für einen Punkt oder einen Ausschnitt des Gebietes Eigenschaften angeben zu können, die in verschiedenen Layern vorliegen, ist daher eine geometrisch-topologische Überlagerung (Verschneidung, Overlay) durchzuführen um eine 1 : N Beziehung zwischen einem topologischen Objekt und den beschreibenden Eigenschaften herzustellen. Wenn mehrere Karten überlagert werden, besteht die Gefahr der „topologischen Zerstückelung“ und die oft sehr aufwändige Notwendigkeit, durch geeignete Klassifikation wieder räumliche Einheiten sinnvoller Größe zu schaffen.

Neuere, so genannte objektorientierte Konzepte der Datenmodellierung in GIS, wie z.B. die GeoDatabase in ArcGIS®, unterstützen eine hierarchische Bildung komplexerer Objekte und die Abbildung von Beziehungen zwischen verschiedenen Layern. Es ist hier also z. B. möglich, bereits im Datenmodell die Beziehung zwischen Gewässerabschnitten, Einzugsgebieten und Pegeln abzubilden. Die Software kann dann sicherstellen bzw. überprüfen, ob ein Pegel tatsächlich exakt am Fluss liegt oder ob sich Einzugsgebietsgrenzen tatsächlich auch an Einmündungen von Zubringern treffen.

### **3. Überblick über GIS-Funktionen zur hydrologischen Regionalisierung**

Der nachfolgende Überblick orientiert sich an der eingangs angeführten Liste von Regionalisierungsaufgaben nach Kleeberg und Cemus (1992).

#### **3.1 Glättung räumlicher Verteilungen**

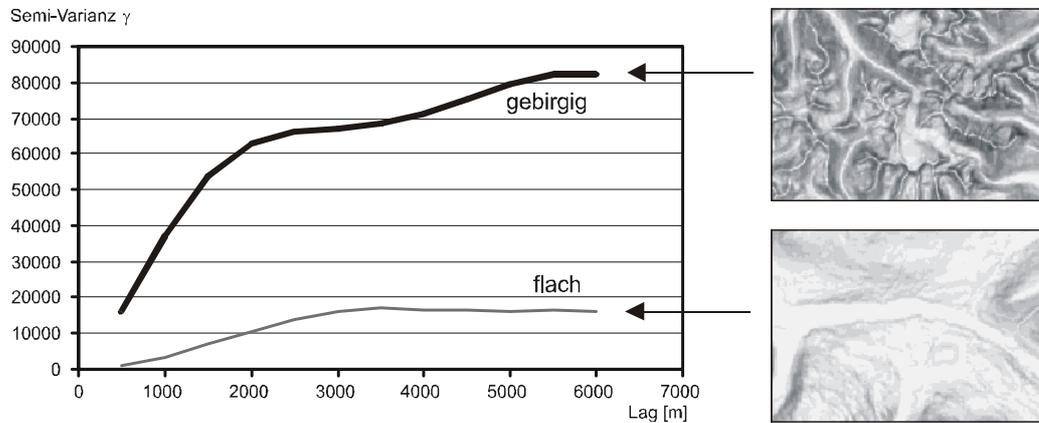
Nicht immer ist die Darstellung der vollen räumlichen Auflösung der Daten erwünscht und sinnvoll. Bei hoch auflösenden Rasterdaten, wie z. B. Bildern oder DHM, ist oft eine Glättung mithilfe von Filteroperationen zweckmäßig, um zufällige Störungen (Rauschen) zu eliminieren. Bei flächenhaften Vektordaten, wie z. B. der Einzugsgebietsgliederung kann es notwendig sein, in Abhängigkeit vom Bearbeitungsmaßstab hierarchisch zu aggregieren. Hoch auflösende Punkt- und Liniendaten können durch geeignete Funktionen als Punkt- bzw. Liniendichte dargestellt werden.

##### **3.1.1 Glättung von Digitalen Höhenmodellen (DHM)**

Speziell für die Anwendung in Abflussmodellen stellt sich die Frage, bis zu welcher Auflösung ein DHM durch Filterung oder Resampling generalisiert werden kann, ohne zu viel Information zu verlieren. Eine ausführliche Diskussion findet sich z.B. in Vieux (2001).

Die Geländeoberfläche hat eine gewisse räumliche Autokorrelation, d.h. die Höhen benachbarter Punkte sind ähnlich. Die Korrelationslänge gibt an, bis zu welcher Distanz die Höhen miteinander korreliert sind, bzw. ab welcher sie als voneinander unabhängig anzusehen sind. Daraus lässt sich auch die für einen bestimmten Zweck erforderliche Auflösung eines DHM schätzen. Ablesbar ist die Korrelationslänge auch im empirischen Semivariogramm, dessen Erstellung durch viele Pakete zur

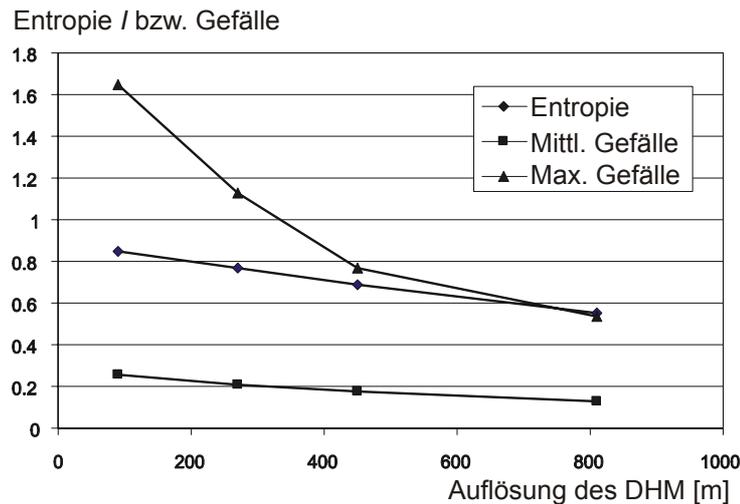
geostatistischen Interpolation unterstützt wird. In Abbildung 1 sind die Semivariogramme für 2 Ausschnitte aus einem DHM mit 90 m Auflösung dargestellt. Im Ausschnitt aus dem gebirgigen Teil ist die Semivarianz wesentlich größer, dafür die Reichweite geringer als im flacheren Teil des Gebietes.



**Abb. 1:** Empirische Semivariogramme aus 2 je ca. 16 x 11 km großen Ausschnitten eines DHM mit 90 m Auflösung

Die Frage nach der notwendigen Auflösung eines DHM für hydrologische Anwendungen lässt sich auch mithilfe des Informationsgehaltes behandeln. Die in der Informationstheorie verwendete Entropie  $I$  (Shannon and Weaver, 1964), die sich leicht aus dem Histogramm einer Karte berechnen lässt, wird zu einer Maßzahl für die räumliche Variabilität, wenn sie für Raster-DHM angewendet wird (Vieux, 2001).

Die Abhängigkeit der Entropie  $I$  von der Auflösung des DHM verhält sich ähnlich wie das mittlere Gefälle eines Gebietes (Abbildung 2). Wenn wir von einem hoch auflösenden DHM ausgehen und schrittweise durch Resampling gröbere DHM daraus ableiten, ergeben sich für die Anwendung in einem Abflussmodell zwei gegensätzliche Effekte. Die Fließwege werden verkürzt, da viele kleinere Flusskrümmungen durch die große Maschenweite abgeschnitten werden. Dieser Effekt führt zu einer Beschleunigung des Abflusses. Der zweite Effekt bewirkt eine Verringerung des Gefälles, wodurch sich eine Verzögerung des Abflusses ergeben kann. Dazu kommt noch eine Überschätzung des Einzugsgebietes, wenn die Rasterweite zu groß wird.



**Abb. 2:** Zusammenhang zwischen Entropie, Gefälle und Auflösung des DHM (Gefälle als  $\tan(\text{Gefällswinkel})$ )(Fürst, 2004)

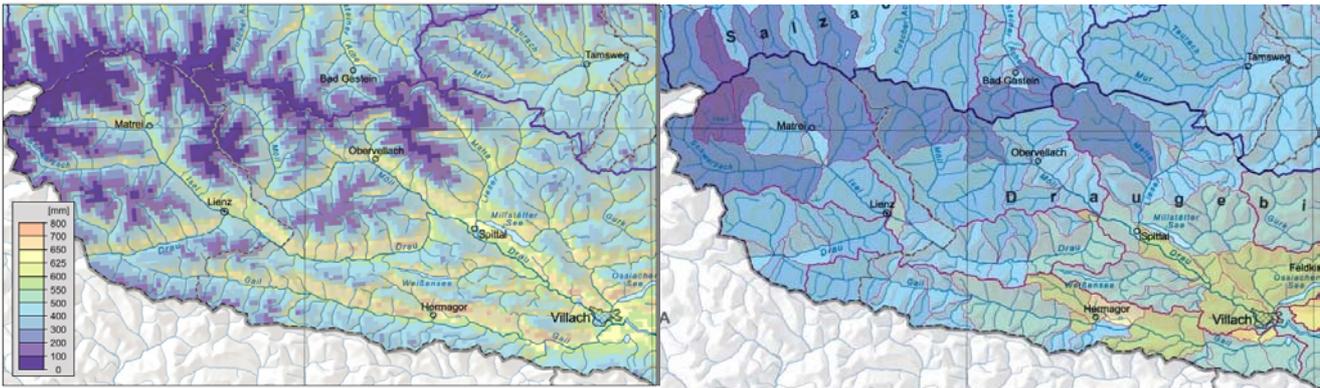
### 3.1.2 Hierarchische Aggregation von Einzugsgebietseigenschaften

Gewässernetze und die zugehörigen Einzugsgebiete weisen eine natürliche hierarchische Gliederung auf, die z. B. durch eine Pfafstetter-Codierung gekennzeichnet werden kann. Sowohl für Eingangsdaten, Modellparameter als auch Ergebnisse hydrologischer Modelle ist oft die Aufgabe zu lösen, Auswertungen mit unterschiedlicher räumlicher Detailliertheit durchzuführen. Dabei ist es wünschenswert, Flächen nicht beliebig zusammenzufassen, sondern die Gewässerordnung zu berücksichtigen. Im digitalen Hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO) wurden aufeinander abgestimmte GIS-Datensätze der Pegel, Fließgewässer und Einzugsgebiete publiziert, deren Elemente durch eine Gebietskennzahl HAOGK identifiziert sind (Fürst und Hörhan, 2005). Diese Gebietskennzahlen bilden eindeutig die Gewässernetz-Hierarchie ab, sodass es durch einfache Auswahlkriterien anhand dieser Kennzahl möglich ist, Einzugsgebiete gleicher Ordnung zusammenzufassen (Abbildung 3) oder alle Oberliegergebiete zu einem Pegel auszuwählen und für das Gebiet aggregierte Informationen wie Gebietsniederschlag oder Abflusshöhe auszuwerten (Abbildung 4).

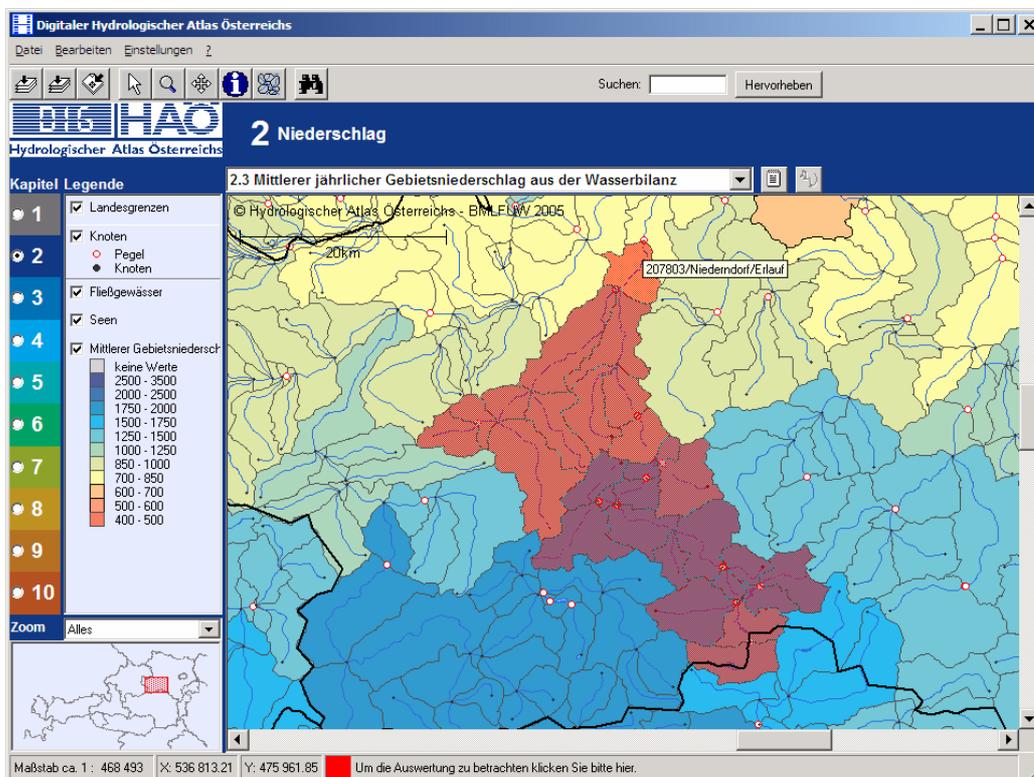
### 3.1.3 Schätzung der Gewässernetzdichte

Die Flusssdichte  $DF$  ist eine häufig verwendete morphometrische Größe zur Charakterisierung der Gebietsentwässerung. Sie ist definiert als Länge der in einer Karte dargestellten Fließgewässer pro Flächeneinheit ( $\text{km}/\text{km}^2$ ). Die Gewässernetzdichte berücksichtigt zusätzlich die Ufer der Seen, da auch Seen den Flüssen ähnliche hydrologische Wirkungen für die Gebietsentwässerung haben. Die Darstellung der Gewässernetzdichte bietet außerdem die Möglichkeit, zumindest einen Teil der in der großmaßstäblichen topographischen Karte ÖK 50 über das Gewässernetz enthaltenen Information in kleinen Maßstäben wie z. B. im HAÖ (1 : 1 000 000) kartographisch sinnvoll darzustellen.

Die Gewässernetzdichte ist eine stark maßstabsabhängige Größe. Um eine flächenhafte Darstellung der Gewässernetzdichte zu ermitteln, gibt es mehrere Alternativen. In der Literatur (Mangelsdorf und Scheurmann, 1980) wird die Ermittlung der Flussdichte bezogen auf Einzugsgebiete beschrieben. Die Vorgangsweise hat den Nachteil, dass infolge der unterschiedlichen Einzugsgebietsflächen auch die berechneten Flussdichten keinen einheitlichen Flächenbezug aufweisen und Kartendarstellungen davon daher ein unruhiges Bild ergeben, das stark durch die Größe der Einzugsgebiete bestimmt wird.

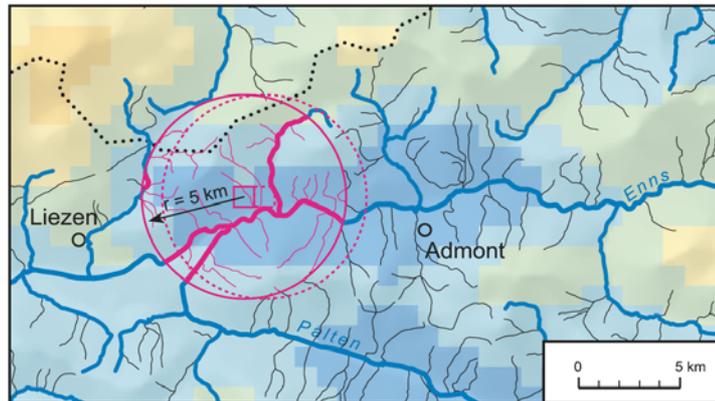


**Abb. 3:** Einzugsgebietsbezogene Aggregation hoch auflösender Modellergebnisse (Kling et al., 2005)



**Abb. 4:** Raumbezogene Auswahl von Teilgebieten aufgrund der Einzugsgebietshierarchie im digitalen HAÖ (Fürst und Hörhan, 2005)

Bei rasterbezogenen Berechnungen der Liniendichte ist der Flächenbezug konstant und kann durch die Wahl der Rastergröße beliebig gesteuert werden. Um sowohl einen konstanten Flächenbezug sicherzustellen als auch ein glattes, ansprechendes Kartenbild zu erzielen, eignen sich Kernschätzungsverfahren für die Berechnung der Liniendichte (Silverman, 1986), wie sie in GIS zur Verfügung stehen. Für die Karte der Gewässernetzdichte im HAÖ erfolgte die Berechnung der Liniendichte jeweils für Rasterzellen von 250 x 250 m, es werden dafür jedoch die Linien in einem Umkreis mit einem Radius von 5 km distanzabhängig gewichtet einbezogen (Fürst, 2003).

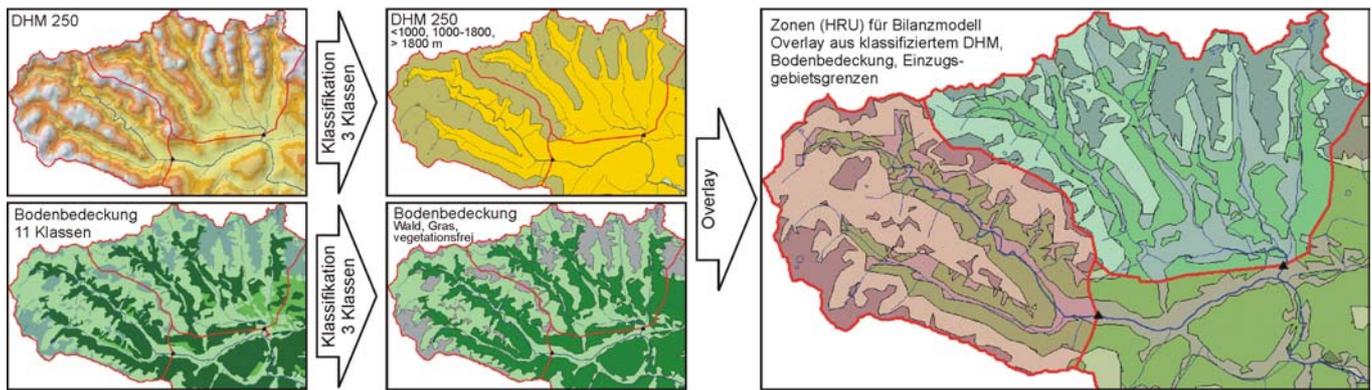


**Abb. 5:** Berechnung der Liniendichte mittels Kernschätzer (blaue Linien: Gewässernetz des HAÖ, schwarze Linien: zusätzliche Gewässer aus der ÖK 50) (Fürst, 2003)

### 3.2 Ausweisung homogener Teilgebiete

Eine sehr leistungsfähige Klasse hydrologischer Modelle beruht auf der parallelen Anwendung einfacher Modellkonzepte auf hydrologisch ähnlich reagierende Gebiete (Hydrological Response Units, HRU). Die wesentlichen Schritte der Anwendung bestehen in der Identifikation der maßgeblichen Gebietsinformationen und daran anschließend der Klassifikation in eine geringe Anzahl hydrologisch ähnlicher Gebiete. Die relevanten Gebietsinformationen liegen dafür im GIS als Karten mit unterschiedlichen räumlichen Einheiten vor, wobei häufig ein Geländehöhenmodell, die Bodenbedeckung, die Bodentypen und die Geologie Verwendung finden.

Selbst wenn jede dieser Karten bereits in eine kleine Anzahl von Attributwerten klassifiziert ist, ergibt sich durch die Überlagerung eine große Zahl von Flächen mit jeweils eindeutiger Kombination von Attributen (Abbildung 6). Nach der Überlagerung der maßgeblichen Einflussgrößen ist daher meist eine weitere Klassifikation notwendig, um die Anzahl der verschiedenen HRU zu reduzieren.



**Abb. 6:** Identifikation von hydrologisch ähnlichen Gebieten mittels Überlagerung von Karten der Einflussgrößen

### 3.3 Übertragung von Punktinformationen innerhalb eines Gebietes auf die Fläche

Die messtechnische Erfassung vieler hydrologischer Größen erfolgt punktbezogen, d. h. an einer für repräsentativ erachteten Anzahl von Messstellen, während die Variable selbst flächendeckend definiert ist. Beispiele dafür sind Niederschlag, Grundwasserstand oder Geländehöhe, die konzeptionell als kontinuierliche Felder abzubilden sind. Ebenfalls flächendeckend definiert sind auch Bodenparameter, wobei diese aber vielfach nicht als kontinuierliche Felder modelliert werden, sondern es werden innerhalb eines Bodentyps relativ einheitliche Werte angenommen.

Die Übertragung der Punktwerte kontinuierlicher Felder auf die Fläche erfolgt durch Interpolationsverfahren. Voraussetzung ist in jedem Fall, dass die Abstände zwischen benachbarten Messstellen gering genug sind, um einen ausreichenden Zusammenhang der Werte der Variablen zu gewährleisten. Dieser Zusammenhang wird bei der Wahl deterministischer Interpolationsverfahren aufgrund der Sachkenntnis des Bearbeiters angenommen, während der wesentliche Aspekt bei der Anwendung geostatistischer Interpolationsverfahren die explizite Analyse der räumlichen Korrelation ist. GIS bieten eine Auswahl gängiger deterministischer und geostatistischer Interpolationsverfahren mit teilweise sehr leistungsfähiger Unterstützung für die Aufbereitung der Daten, die Wahl geeigneter Parameter für die Interpolation und die Visualisierung der Ergebnisse (z. B. ArcGIS® Geostatistical Analyst). Die Interpolation erfolgt üblicherweise auf ein Raster, dessen Auflösung gewählt werden kann.

Festzuhalten ist, dass auch die Interpolationsfunktionen von GIS – wie die meisten anderen Funktionen – sehr allgemein für beliebige raumbezogene Daten implementiert sind und die sachgerechte Anwendung für hydrologische Größen in der Verantwortung der Benutzer liegt. Die nach wie vor immer wieder anzutreffenden Karten mit „Fettaugeneffekt“ infolge unkritischer Verwendung der meist voreingestellten IDW-Methode (Inverse Distanzgewichtung) stimmen diesbezüglich eher pessimistisch.

Eine einfache, durch GIS unterstützte Methode der Übertragung von Punktinformationen auf die Fläche ist die beliebte THIESSEN-Methode, die im

Raster-GIS einfach jeder Rasterzelle den Wert der nächstgelegenen Messstelle zuordnet.

Sind die Punktinformationen repräsentativ für bestimmte, beliebig abgegrenzte Zonen (z. B. Bodentypen), so können sie mithilfe so genannter räumlicher Verknüpfung („spatial join“) oder attributbasierter Verknüpfung auf diese Zonen übertragen werden.

### **3.4 Übertragung von Punktinformationen aus einem Gebiet auf Punkte eines anderen Gebietes**

Die Übertragung von Punktinformationen aus einem Gebiet auf Punkte eines anderen Gebietes ist auf Grund gemeinsamer Eigenschaften der Punkte oder deren Umgebung möglich. Ein konkretes Beispiel könnte die Übertragung von Bodeneigenschaften sein, die in einem Gebiet an verschiedenen Standorten für verschiedene Bodentypen erfasst wurden und anhand einer Bodenkarte und weiterer Informationen (Geologie, Höhenmodell) bestimmten Standorten im anderen Gebiet zugeordnet werden. Weitere Beispiele, wie die Anwendung multipler Regressionen, werden in eigenständigen Beiträgen in diesem Band behandelt. Geeignete GIS-Funktionen zur Unterstützung können u. a. sein: Overlays, Klassifikation, Verknüpfung von Tabellen.

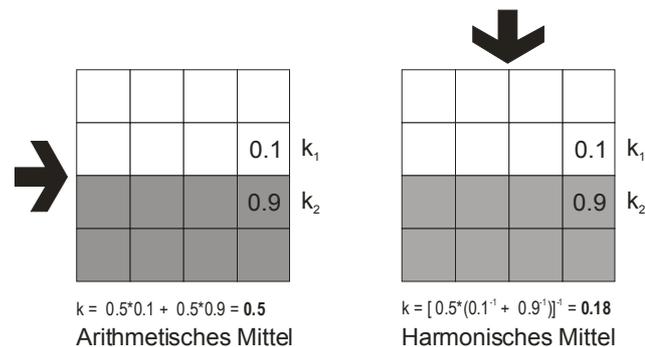
### **3.5 Änderung von Modellparametern bei der Übertragung vom Punkt auf den Raum**

Parameter hydrologischer Modelle, die Gebietseigenschaften beschreiben, werden vielfach punktbezogen beobachtet. Ein Beispiel dafür ist der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) eines Aquifers. Die Ermittlung erfolgt durch Analyse von Bodenproben, Tracerversuche oder Pumpversuche. Die erzielten Werte beziehen sich auf unterschiedlich große Bodenkörper, aber selbst aus einem Pumpversuch ermittelte kf-Werte gelten nur für einen kleinen Ausschnitt des Untergrundes. Vielfach erfolgt die Übertragung punktbezogener kf-Werte auf die Fläche durch Interpolation, obwohl die Annahme einer glatten räumlichen Verteilung meist kaum belegbar ist.

Vorsicht ist bei Veränderungen des Maßstabs bzw. der Auflösung in beide Richtungen geboten. Die Übertragung von räumlich heterogenen hydrologischen Parametern ist im Allgemeinen stark nichtlinear und daher nicht durch allgemeine, meist mittelnnde Prozeduren der GIS durchführbar.

Aus der Geohydraulik ist die Ermittlung eines „mittleren“ Durchlässigkeitsbeiwertes in einem geschichteten Boden vertraut, die analog auch für 2-dimensional ebene Grundwasserströmung anwendbar ist. Abbildung 7 illustriert schematisch die Abhängigkeit des repräsentativen Durchlässigkeitsbeiwertes von der Strömungsrichtung. Eine Übertragung der Durchlässigkeitsbeiwerte von einem feinen auf ein gröberes Raster kann daher nicht unter Einbeziehung nur der Karte der Durchlässigkeitsbeiwerte durchgeführt werden, sondern muss unter Verwendung eines Grundwasserströmungsmodells erfolgen. Renard and de Marsily (1997) geben eine

ausführliche Diskussion der Methoden zur Berechnung effektiver Durchlässigkeiten für numerische Grundwassermodelle.



**Abb. 7:** Unterschiedliche Mittelung von Durchlässigkeitsbeiwerten in Abhängigkeit von der Fließrichtung (Fürst, 2004)

Ähnlich komplex ist die Übertragung effektiver Rauigkeiten bei einem Maßstabswechsel von verteilten Niederschlags-Abflussmodellen zu sehen. Generell ist die Ermittlung „effektiver“ oder „repräsentativer“ Parameter des Fließwiderstandes (Durchlässigkeitsbeiwert, Rauigkeit) für die Modellierung von Massenbilanzen noch einigermaßen vertretbar. Soll das zeitliche Verhalten einer Schadstoffausbreitung wiedergegeben werden, versagt eine solche Vorgangsweise jedoch gravierend. Bevorzugte Wegigkeiten, die für den Stofftransport wichtig sind, werden durch „mittlere“ Durchlässigkeiten und Rauigkeiten nicht wiedergegeben.

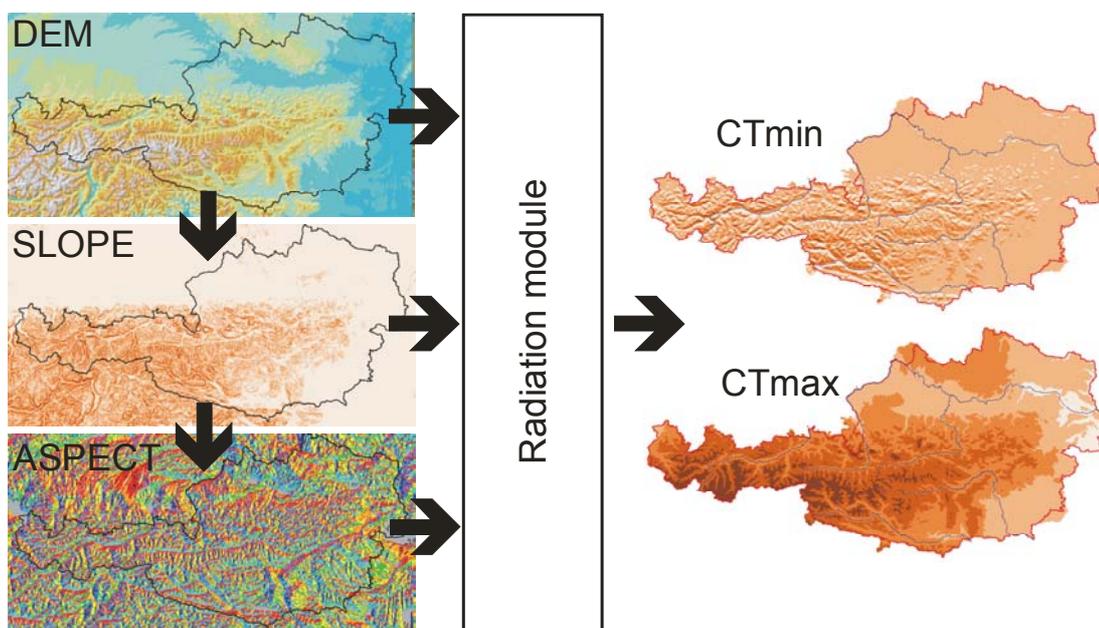
Beim Übergang von einer groben Auflösung auf eine feinere ist sorgfältig auf die verwendeten Algorithmen des „Resamplings“ zu achten. Meist werden nur die Punktwerte an den Rasterpunkten des neuen Rasters übernommen, was zu stufenförmigen Ausprägungen des „verfeinerten“ Rasters führt. Das ist bei Variablen mit einer nominalen Skala („Wald, Wiese, Acker“) in Ordnung, würde aber bei einer Grundwasserspiegellage nicht sinnvoll sein. Da bei einer Verfeinerung der Auflösung keine Information gewonnen wird, ist allgemein vor einer Vorspiegelung nicht vorhandener Genauigkeit zu warnen. Eine ausreichende Dokumentation der einer Karte zugrunde liegenden Originalinformation ist daher sehr wichtig (Metadaten).

### 3.6 Abhängigkeit von Modellparametern von gebietspezifischen Merkmalen

Zur Erstellung von Karten der räumlich verteilten Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Abflusshöhe und aktuelle Verdunstung für Österreich wurde das räumlich verteilte, konzeptionelle Wasserbilanzmodell COSERO angewendet (Nachtnebel und Fuchs, 2004). Ein Einzugsgebiet kann in Teileinzugsgebiete und diese wiederum in Zonen untergliedert werden. Jede Zone hat einen spezifischen Modellparameter-Satz, der von Landnutzung, Seehöhe, Exposition, etc. abhängt. Die Eingangsgrößen für die Berechnungen einer Zone sind die monatliche Niederschlagssumme und das Monatsmittel der Temperatur.

In die Anwendung des Wasserbilanzmodells gingen eine Reihe von Informationen anderer Karten des HAÖ ein: Einzugsgebietsgliederung, Bodenübersichtskarte, Bodenbedeckung, Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten, Dauer von Trockenperioden, Mittlere potentielle Jahresverdunstung, Schneehöhen und Schneebedeckung, Wasserstands- und Abflussmessstellen. Für jede Modellzone (1 x 1 km Raster) wurden die Modellparameter aus den oben angeführten Ausgangsdaten geschätzt. Die Kalibrierung von Parametern des Wasserbilanzmodells verfolgte das Ziel, eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Abflüssen für alle Teilgebiete zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden die Parameter-Sätze, die innerhalb des Bundesgebietes für Klassen der Landnutzung, Seehöhe, Bodentypen, etc. einheitlich gewählt wurden, möglichst geringfügig innerhalb physikalisch plausibler Grenzen variiert.

Als Beispiel für die Schätzung von Modellparametern aus verteilt vorliegenden Gebietsmerkmalen zeigt Abbildung 8 die räumlich verteilten Schneeschmelz-Faktoren CTmin und CTmax, die unter Verwendung eines Strahlungsmoduls und eines DHM berechnet wurden. Das Modell berücksichtigt jahreszeitlich und räumlich variable Grad-Tag-Faktoren. CTmin bezieht sich darin auf den 21. Dezember als kürzesten Tag des Jahres, CTmax auf den 21. Juni. Es ist erkennbar, dass der Einfluss von Gefälle und Exposition für CTmin dominiert, weil in den Breiten von 47 bis 49 ° N der Winkel der Sonne während der Winterzeit ziemlich niedrig ist und Südhänge deshalb viel mehr kurzweilige Strahlung erhalten als Nordhänge. Der Haupteinfluss auf CTmax im Sommer ist die Höhe. Die räumlich verteilten Schmelzfaktoren werden verwendet, um die Schneeschmelze für jede 1x1 km Rasterzelle zu simulieren.



**Abb. 8:** Ermittlung räumlich verteilter Schneeschmelzfaktoren (Kling et al., 2006)

### **3.7 Datenbanken, Informations- und Wissenssysteme**

Information über Einzugsgebietseigenschaften kann auch aus großräumigen, sogar globalen Datenbanken abgeleitet werden. Beispiele dafür sind die Bodenbedeckungskarten aus dem CORINE LC Programm (Aubrecht, 1998), globale DHM wie das HYDRO1K oder die „Digital Soil Map of the World“ der FAO. Zappa (2002) entwickelte beispielsweise eine Prozedur, die unter Verwendung eines DHM, der FAO Bodenkarte und einer Landnutzungskarte die Parameterisierung der Bodeneigenschaften für das Abflussmodell PREVAH durchführt.

### **3.8 Archivierung und Nutzung räumlich hoch aufgelöster Informationen**

Einer der wichtigsten Aspekte der GIS-Unterstützung für hydrologische Modelle besteht in der Möglichkeit, zunehmend mehr räumlich hoch aufgelöste Informationen zu nutzen, um die Kalibrierung und Validierung der Modelle zu verbessern. Einerseits gibt es zunehmend mehr Daten, vor allem durch Fortschritte in der Fernerkundung (z. B. Laser-Scan, Satellitenfernerkundung), andererseits erlauben auch die Modelle in Verbindung mit leistungsfähigen Computern deren Nutzung.

Konkrete Erfahrungen mit der Nutzung von Satellitenbildern der Schneedecke zur Validierung eines hydrologischen Modells sind z. B. in Tarboton et al. (2000) enthalten. Die Entwicklung verbesserter Sensoren lässt auch hoffen, in Zukunft den Feuchtezustand des Bodens räumlich hoch auflösend zu erfassen und für die Modellanwendung nutzbar machen zu können.

Eine wertvolle Hilfe für regionalhydrologische Untersuchungen können auch Hydrologische Atlanten sein, vor allem, wenn – wie im Digitalen Hydrologischen Atlas Österreichs (BMLFUW, 2005) – inhaltlich, geometrisch und topologisch aufeinander abgestimmte Datensätze den Anwendern in gängigen GIS Datenformaten zur Verfügung stehen.

### **3.9 Darstellung von Feldern hydrologischer Daten (Visualisierung)**

Es ist eine der Kerndomänen von GIS, thematische Karten unterschiedlichster Art darzustellen. Durch geeignete Visualisierung können in den Daten vorhandene Strukturen sichtbar gemacht werden und so zum besseren Verständnis der Zusammenhänge und Prozesse beitragen. Zahlreiche Beispiele dazu finden sich in den übrigen Beiträgen dieses Bandes, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

## **4. Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurde ein Überblick darüber gegeben, wie hydrologische Regionalisierungsaufgaben mit GIS unterstützt werden können. Grundlage sind geeignete Datenstrukturen, wobei insbesondere die Entscheidung, ob eine Variable als kontinuierliches Feld oder in einem Entitätenmodell abgebildet wird, die weiteren Anwendungsmöglichkeiten bestimmt.

GIS enthalten Werkzeuge, die praktisch alle Bereiche der Regionalisierung unterstützen können. Viele Aufgaben können vollständig mit den Funktionen eines GIS gelöst werden. In allen Fällen unterstützen GIS die Erfassung und Verwaltung der Daten, die Analyse, sowie die Interpretation und Präsentation der Ergebnisse.

## 5. Literatur

Aubrecht, P. (1998) CORINE Landcover Österreich. In: Monographien Bd. 93. Wien: Umweltbundesamt (Hrsg.)

BMLFUW (2005) Hydrologischer Atlas Österreichs. 2. Lieferung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.). Wien. ISBN 3-85437-250-7.

Kling, H., Nachtnebel, H.P. und Fürst, J. (2005) Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse - Water balance regions, climatic water balance and runoff characteristics. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Karte 7.1; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7.

Fürst, J. (2003) Gewässernetzdichte - Karte mit Erläuterungen. In: BM:LFUW (Hrsg.), Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung, Karte 5.2; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien; ISBN 3-85437-250-7.

Fürst, J. (2004) GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg; ISBN 3-87907-413-5.

Fürst, J. und Hörhan, T. (2005) Einzugsgebietsgliederung. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Karte 1.3; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7.

Kleeberg, H.-B. und Cemus, J. (1992) Regionalisierung hydrologischer Daten – Definitionen. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.) Regionalisierung in der Hydrologie (DFG). Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH., ISBN: 3-527-27551-7

Kling, H., Nachtnebel, H.P. und Fürst, J. (2005) Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Karte 7.1; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7.

Kling, H., Fürst, J. und Nachtnebel H.P. (2006) Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large basin water balance model. *Hydrological Processes* (im Druck).

Mangelsdorf, J. und Scheurmann, K. (1980) Flussmorphologie. München: Oldenbourg.

- Nachtnebel, H. P. und Fuchs, M. (2004) Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. 56 (7/8) : 79-92.
- Renard, P. and de Marsily, G. (1997) Calculating equivalent permeability: a review. *Advances in Water Resources* 20 (5-6): 253-278.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1964) The mathematical theory of communication. Urbana, Illinois: University of Illinois Press.
- Silverman, B.W. (1986) Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall.
- Tarboton, D., Blöschl, G., Cooley, K., Kirnbauer, R. and Luce, Ch. (2000) Spatial snow cover processes at Kühtai and Reynolds Creek. In: Grayson, R. and Blöschl, G. (eds.): Spatial patterns in catchment hydrology. Cambridge University Press, UK. 158-186.
- Vieux, B. E. (2001) Distributed hydrologic modeling using GIS. Water Science and Technology Library. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
- Zappa, M. (2002) Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. Dissertation. ETH Zürich.

**Anschrift des Verfassers:**

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Fürst  
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau  
Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt  
Universität für Bodenkultur Wien  
Muthgasse 18, A-1190 Wien  
Tel. +43 1 36006 5511, Fax. +43 1 36006 5549  
E-mail: josef.fuerst@boku.ac.at  
<http://www.wau.boku.ac.at/iwhw.html>

## **DATENPRÜFUNG UND -VERFÜGBARKEIT BEIM HYDROGRAPHISCHEN DIENST IN ÖSTERREICH**

Gabriele Müller

### **1. Daten als Grundlage für die Regionalisierung**

Schon in alten Zeiten waren Beobachtungen des Wasserstandes der Flüsse im Jahres- und im mehrjährigen Verlauf von großer Bedeutung für die Menschen. Aus der Messung der Hochwasserstände des Nils wurden zum Beispiel im alten Ägypten Schlussfolgerungen über zu erwartende Ernteerträge abgeleitet und die Messungen bildeten die Grundlage für die Festlegung von Steuern und Nutzungsrechten.

In der heutigen Zeit unterliegen die Wasserressourcen einer intensiven Nutzung, und das auch in Gebieten, in denen das Wasser eigentlich nicht in genügender Menge vorhanden ist. Mit der Veränderung des Klimas sind auch Änderungen im Wasserkreislauf und damit im Wasserdargebot zu erwarten. Eine nachhaltige Wasserwirtschaft, die auf der Kenntnis der natürlichen Regimefaktoren sowie der anthropogen verursachten Veränderungen und ihrer Auswirkungen auf den Wasserhaushalt aufbaut, ist somit dringend erforderlich. Die dazu notwendigen Basisdaten liefern die hydrographischen Einrichtungen zur Beobachtung der Komponenten des Wasserkreislaufes.

Diese Messwerte sind in der Regel Punktmessungen und streng genommen nur für den Ort ihrer Gewinnung aussagekräftig bzw. sind Ausdruck des Zusammenspiels von Einflussfaktoren und Teilprozessen. In den meisten Fällen interessieren den Nutzer der Daten jedoch Aussagen für eine größere Fläche oder für ganze Einzugsgebiete, für die möglicherweise keine Messungen vorliegen oder Messungen nicht möglich sind. Um dennoch zu Flächeninformationen zu kommen, bieten sich die Methoden der Regionalisierung oder regionalen Übertragung an. Im Sinne eines Oberbegriffes wurde von Becker (1992) folgende Begriffsbestimmung vorgeschlagen:

Regionalisierung ist die regionale Übertragung oder flächenmäßige Verallgemeinerung (Generalisierung) einer Größe oder einer Funktion (dieses Modells) bzw. der Parameter dieser Funktion (dieses Modells).

Unter Berücksichtigung des mit der Regionalisierung oder regionalen Übertragung verbundenen Maßstabs- oder Skalenaspektes werden drei Haupttypen der Regionalisierung unterschieden:

- Bestimmung der flächenmäßigen Verteilung einer Größe mit oder ohne Anwendung geeigneter Übertragungsfunktionen
- Flächenmäßige Aggregation bzw. Integration von lokalen, elementar- oder teilflächenbezogenen Informationen
- flächenmäßige Disaggregation bzw. Differenzierung.

Zuverlässiges Datenmaterial stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung von Methoden der Regionalisierung dar. In Österreich werden hydrologisch relevante Daten von mehreren Betreibern mit unterschiedlicher Zielsetzung erhoben. Als wichtigste sind neben dem Hydrographischen Dienst die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die großen Kraftwerksgesellschaften zu nennen. Das größte Messnetz zur Erhebung des Wasserkreislaufes betreibt der Hydrographische Dienst, der auch für eine einheitliche Qualität der Daten Sorge trägt (Godina, 2002). Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Daten, die durch den Hydrographischen Dienst in Österreich gewonnen, geprüft und veröffentlicht werden.

## **2. Daten beim Hydrographischen Dienst in Österreich**

### **2.1 Datengewinnung**

Auf der Grundlage des Wasserrechtsgesetzes (WRG) von 1959, des Hydrographiegesetzes von 1979, der Novelle des WRG 2003 sowie der in Vorbereitung befindlichen Verordnung über die Erhebung des Wasserkreislaufes in Österreich (WKEV) hat der Hydrographische Dienst die Aufgabe „den Wasserkreislauf zu erheben“. Die getroffenen Festlegungen in den nationalen Gesetzen entsprechen der Vorgabe der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates).

Die „Erhebung des Wasserkreislaufes“ bezieht sich auf die Gewinnung von Daten über Oberflächenwasser, Grundwasser, Quellen, Niederschlag, Verdunstung, die Feststoffe in den Gewässern, sowie zur Temperatur von Luft und Wasser, zur Eisbildung in den Gewässern und im Hochgebirge und auf die den Wasserkreislauf beeinflussenden oder durch ihn ausgelösten Nebenerscheinungen. Dazu sind die Einrichtung und der Betrieb von Messnetzen zur Datengewinnung und die Aufbereitung und Auswertung, die Qualitätssicherung, Bereitstellung, Dokumentation und Veröffentlichung der Daten des Wasserkreislaufes erforderlich.

Im Hydrographischen Dienst gliedern sich die Aufgaben in drei Sachgebiete:

- Atmosphärischer Bereich (Niederschlag, Lufttemperatur, Verdunstung - NLV)
- Oberflächenwasser und Feststoffe (OWF)
- Unterirdisches Wasser einschließlich Quellen (UWQ)

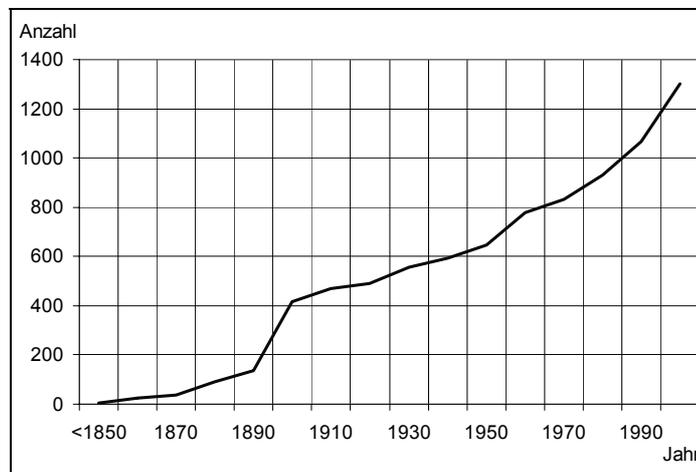
Karten und detaillierte Erläuterungen zu den Messnetzen der Sachgebiete enthält der Hydrologische Atlas Österreichs (BMLFUW, 2003), die nachfolgenden Ausführungen geben einen Überblick.

#### **2.1.1 Atmosphärischer Bereich (NLV)**

Die ersten regelmäßigen instrumentellen Niederschlagsbeobachtungen auf österreichischem Gebiet gab es vor etwa 300 Jahren. Die längste durchgehend vorhandene Beobachtungsreihe stammt aus dem Benediktinerstift Kremsmünster, wo

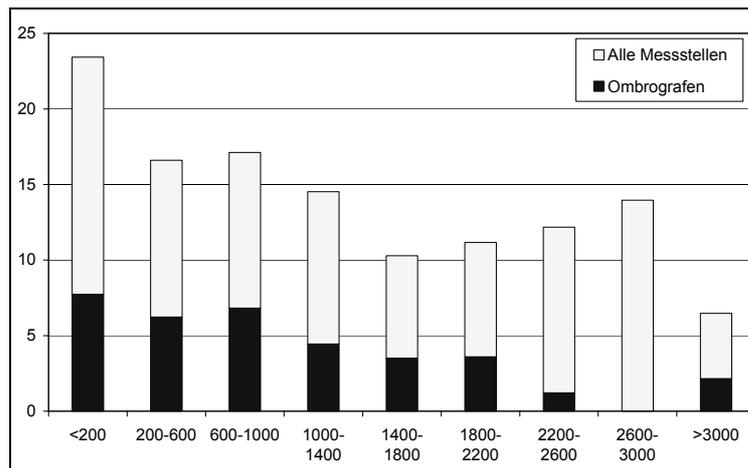
seit 1791 ununterbrochen der Niederschlag gemessen wird. Im Jahr 1851 wurde mit der Gründung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) ein meteorologisches Messnetz eingerichtet und mit regelmäßigen Niederschlagsbeobachtungen begonnen. Mit der Gründung des Hydrographischen Zentralbüros 1893 kam es zu einer wesentlichen Erweiterung des Niederschlagsmessnetzes für den Hochwassernachrichtendienst und Wasserbilanzuntersuchungen. Seitdem hat die Anzahl der Messstellen stetig weiter zugenommen (Abb. 1).

Von den 1301 im Jahr 2001 bestehenden Niederschlagsmessstellen waren 148 mit Totalisatoren, 699 mit Ombrometern und 454 mit Ombrographen ausgerüstet. Zusätzlich zur Niederschlagserfassung werden an 933 der bestehenden Messstellen die Schneehöhe bzw. die Neuschneehöhe gemessen, an 798 die Lufttemperatur beobachtet und an 56 die Verdunstung ermittelt.



**Abb. 1:** Entwicklung der Anzahl der Niederschlagsmessstellen in den letzten 150 Jahren

Der Niederschlag ist durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität gekennzeichnet. So können konvektive Niederschlagsereignisse eine Ausdehnung von einigen hundert Metern und eine Dauer von einigen Minuten besitzen und im Vergleich dazu frontale Niederschläge einige hundert Kilometer überdecken und einige Stunden dauern. Durch die starke orographische Gliederung Österreichs wird die räumliche Variabilität noch verstärkt. Um dennoch flächendeckende Aussagen über das Niederschlagsverhalten treffen zu können, ist eine hohe Messstellendichte erforderlich. In Abb. 2 ist die Messstellendichte in verschiedenen Höhenstufen dargestellt. Bezogen auf Flussgebiete beträgt die Dichte der Niederschlagsmessstellen zwischen 10 und 20 pro Quadratkilometer, im Rheingebiet und im Donaugebiet zwischen March und Leitha liegt die Zahl darüber (BMLFUW, 2003).

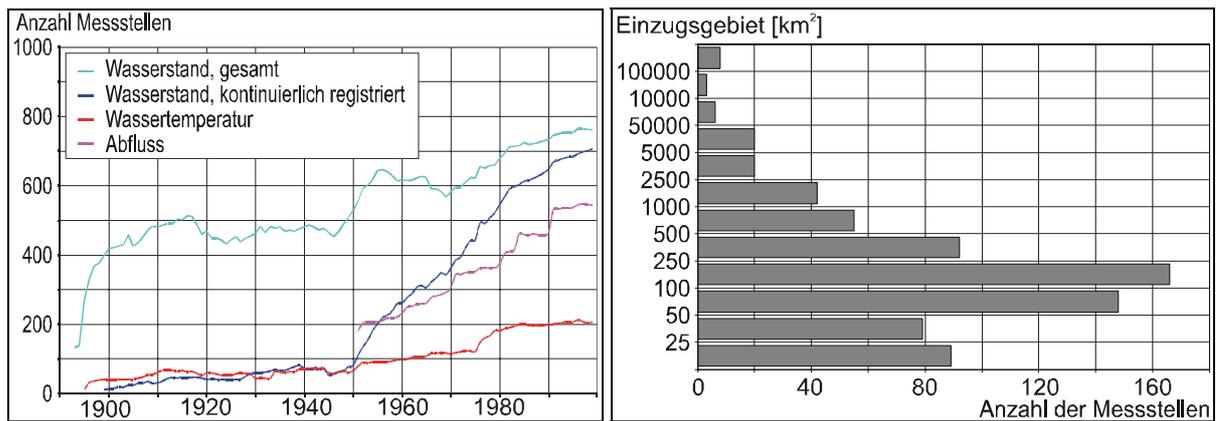


**Abb. 2:** Anzahl der Niederschlagsmessstellen in verschiedenen Höhenstufen

### 2.1.2 Oberflächenwasser und Feststoffe (OWF)

Die systematische Einrichtung eines staatlichen Messnetzes an Oberflächengewässern begann in Österreich mit dem Jahr 1893. Die Entwicklung der Messstellenanzahl ist anhand der in den Hydrographischen Jahrbüchern veröffentlichten Daten gewässerkundlicher Einrichtungen an Oberflächengewässermessstellen in Abb. 3a dargestellt. Ab dem Jahr 1951 bis in die Mitte der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts ist eine anhaltende Zunahme an neuen, kontinuierlich registrierenden Wasserstands- und Durchflussmessstellen erkennbar. In den letzten Jahren wurde mit dem Aufbau eines Schwebstoffmessnetzes begonnen.

Im Jahr 2000 waren die Daten von ca. 700 kontinuierlich registrierenden Wasserstandspegeln, 540 Durchflussmessstellen und ca. 200 Messstellen, an denen die Wassertemperatur gemessen wird, im Hydrographischen Jahrbuch enthalten. An der überwiegenden Anzahl der Messstellen erfolgt die kontinuierliche Beobachtung des Wasserstandes mit Schwimmern, Drucksonden und pneumatischen Pegeln. Zunehmend werden die Messstellen auch mit Radar- und Ultraschalltechnik ausgestattet. Die Messnetzdichte in den einzelnen Flussgebieten ist aufgrund der Gewässerdichte sehr unterschiedlich. Im Bundesgebiet kommt im Mittel eine Wasserstandsmessstelle auf ca. 100 km<sup>2</sup>, wobei dieser Wert im oberösterreichischen Inn- und Salzachgebiet mit einer Messstelle auf 50 km<sup>2</sup> stark überschritten und im Marchgebiet mit einer auf 350 km<sup>2</sup> stark unterschritten wird. Abb. 3b zeigt die Verteilung der Messstellen hinsichtlich der Flächen der beobachteten Einzugsgebiete.



**Abb. 3:** a) Entwicklung der Messstellenanzahl an Oberflächengewässern seit 1893; b) Anzahl der Messstellen für verschiedenen Einzugsgebietsgrößen

### 2.1.3 Unterirdisches Wasser einschließlich Quellen (UWQ)

Als Beginn der Einrichtung und des Betriebes eines bundesweiten Messnetzes für die Beobachtung des Grundwasserhaushaltes in Österreich durch den Hydrographischen Dienst wird das Jahr 1955 angegeben. In einzelnen Gebieten liegen aber bereits systematische Beobachtungen seit 1930 vor. Mit ca. 700 neuen Messstellen war im Zeitraum zwischen 1981-1991 der stärkste Zuwachs zu verzeichnen. Im Jahr 2001 bestanden rund 3000 Messstellen für die Beobachtung des Grundwasserstandes.

Von den etwa 3000 Grundwassermessstellen sind ca. 1800 Peilrohre und 1200 Brunnen. Derzeit wird zumeist der Grundwasserabstich gemessen und nur an ca. 2% der Messstellen der Grundwasserstand (in m ü. A) direkt. An ca. 90% der Messstellen wird in der Regel einmal wöchentlich, in wenigen Gebieten zweimal wöchentlich per Hand von Beobachtern gemessen, hauptsächlich mittels Kabellichtlot, Brunnenpfeife und Rollbandpegel. 190 Messstellen verfügen über eine kontinuierliche Aufzeichnung mittels Schreibstreifen, 140 über Datensammler, die Messungen erfolgen dabei mittels Drucksonden oder Pneumatikpegeln. Entsprechend dem Stand der Technik werden die Messstellen zunehmend mit kontinuierlich registrierenden Geräten ausgerüstet.

An 335 Messstellen wird die Grundwassertemperatur gemessen und an derzeit 37 Messstellen einmal monatlich ein Grundwassertemperaturprofil, das heißt Grundwassertemperaturen in verschiedenen festgelegten Tiefenstufen, erfasst.

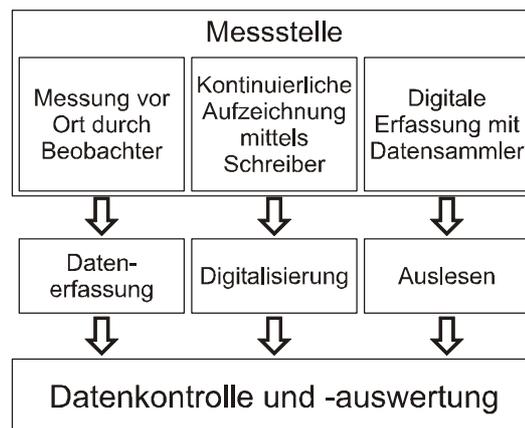
Im Jahr 1995 begann der Aufbau eines Quellmessnetzes in Österreich mit zunächst 10 Messstellen. Ende 2005 existierten bereits 87 Quellmessstellen, an denen Schüttung, Wassertemperatur, Leitfähigkeit und in den meisten Fällen auch Trübung registriert werden. Die Messungen erfolgen kontinuierlich mit Sonden, und mittels Datensammler werden 15-Minuten-Mittelwerte aufgezeichnet (BMLFUW, 2005b).

## 2.2 Datenprüfung bzw. Qualitätssicherung

Die Erfassung, Bearbeitung, Prüfung und Qualitätssicherung der hydrographischen Daten erfolgt mit Hilfe des Hydrographischen Daten-Management-Systems (HyDaMS). Zu jeder Messstelle sind alle hydrologisch relevanten Stammdaten - bei

Abflussmessstellen auch die Pegelschlüssel - in einer relationalen Datenbank gespeichert. Die Daten der Zeitreihen werden in kompakter, binärer Form vorgehalten (Godina, 2002).

Der Sicherung der Datenqualität wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Sie wird durch einen klar definierten Datenfluss von der Datengewinnung bis zur Auswertung mit regelmäßigen Kontrollmessungen, Wartung der Messstellen und Geräte sowie Qualitätskontrollen erreicht (Abb. 4).



**Abb. 4:** Datenfluss zur Qualitätssicherung

Während der Kontrolle und ersten Auswertung durchlaufen die Daten ein umfangreiches Programm. Grundsätzlich umfasst die Qualitätsprüfung folgende Punkte:

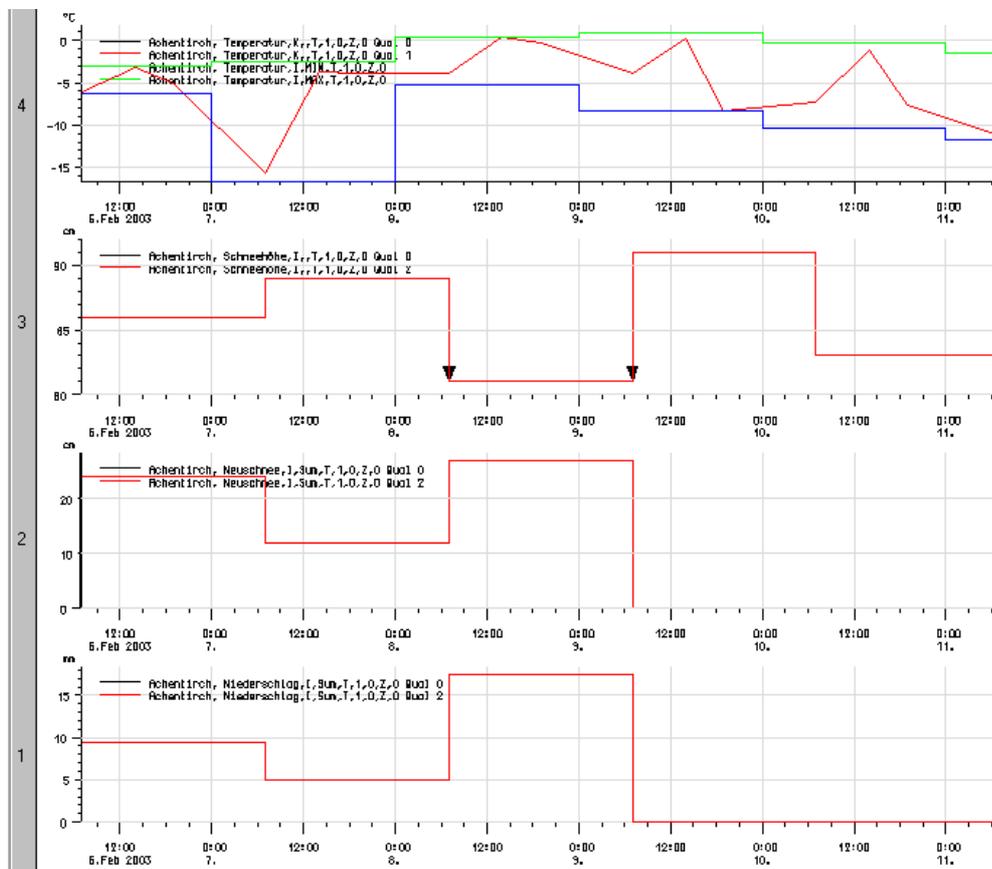
- Korrektur fehlerhafter Daten (Mess-, Aufzeichnungs-, Geräte-, Eingabefehler)
- Ergänzung fehlender Daten
- Plausibilisierung:
  - visuell durch Vergleiche mit Kontrollwerten (z.B. die Wasserstandsganglinie mit Kontrollmessungen), mit typischen Verläufen innerhalb der Zeitreihe (z.B. Jahrgänge), mit benachbarten, vergleichbaren Messstellen oder anderen Parametern, die an der gleichen oder einer in der Nähe befindlichen Messstelle bestimmt werden (z.B. der Grundwasserstand mit Niederschlag und Wasserstand im Oberflächengewässer)
  - rechnerische Kontrolle
- Ermittlung erster Kennwerte bzw. abgeleiteter Größen, z.B. Mittelwerte, Summen, Minima, Maxima, etc.

Zur Nachvollziehbarkeit von Korrekturen und besonderer Gegebenheiten an Messstelle oder im Gebiet, welche die Daten beeinflusst haben, besteht die Möglichkeit, Kommentare und Fußnoten anzubringen, die im Hydrographischen Jahrbuch mit veröffentlicht werden. Da im Detail nicht auf alle Prüfalgorithmen eingegangen werden kann, werden für die Sachgebiete einige typische Beispiele angeführt.

### 2.2.1 Beispiel für die Datenprüfung im Sachgebiet Atmosphärischer Bereich (NLV)

Für die Prüfung von Niederschlagsdaten (Regen, Neuschnee) erfolgt ein visueller und tabellarischer Vergleich mit vergleichbaren benachbarten Messstellen. Fehlerhafte Daten werden korrigiert. Wertvolle Hinweise liefert dabei z.B. auch ein Vergleich von Tagessummen von Ombrometer und Ombrograph. Für den Niederschlag kann die Gegenüberstellung mit anderen Parametern bei der Plausibilisierung helfen. Darüber hinaus gibt es Prüfroutinen, welche auf zu kontrollierende Unstimmigkeiten hinweisen (Zeitpunkte, Werte). Bei der Lufttemperatur können Datenlücken mit Hilfe von vergleichbaren Stationen gefüllt werden, eine Plausibilisierung erfolgt durch Vergleich mit ähnlichen Messstellen oder dem Verlauf in anderen Jahren.

Abb. 5 zeigt ein Beispiel für eine visuelle Überprüfung durch Vergleich mit anderen Parametern. Die oberste Achsbox 4 enthält Temperaturdaten, Achsbox 3 Tageswerte der Schneehöhe, Achsbox 2 Tageswerte der Neuschneehöhe und die unterste Achsbox 1 die Tagessummen des Niederschlages (Summe fest und flüssig). Bei der Schneehöhe (Achsbox Nr. 2) fällt auf, dass diese am dritten Tag (8. Februar) plötzlich um 8 cm abnimmt. Niederschlag (Achsbox 1) und Neuschnee (Achsbox 2) belegen aber, dass es an diesem Tag Niederschlag gab, und zwar in Form von Schnee. Auch die Temperaturen (Achsbox 4) blieben im negativen Bereich, es trat kein Tauwetter ein. Damit liegt auf der Hand, dass der Wert der Schneehöhe für den Tag fehlerhaft ist und korrigiert werden muss.

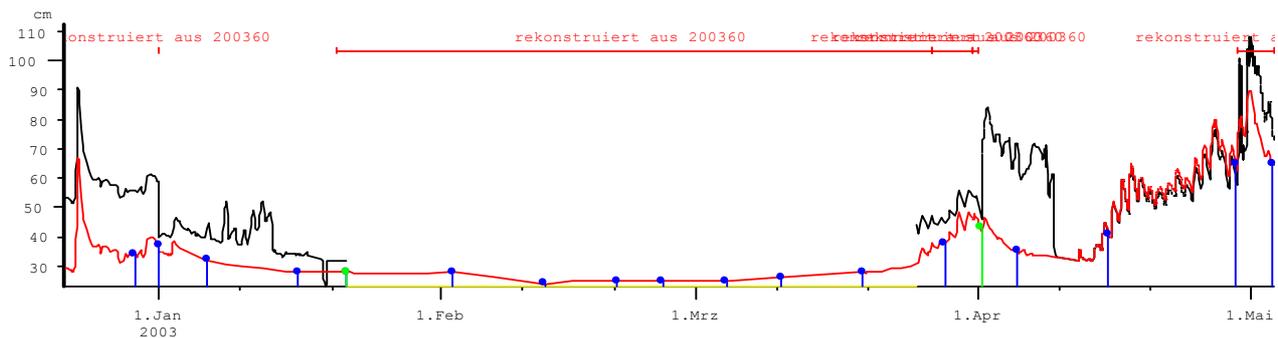


**Abb. 5:** Beispiel für die visuelle Überprüfung von Schneehöhendaten durch Vergleich mit anderen Parametern

## 2.2.2 Beispiel für die Datenprüfung im Sachgebiet Oberflächenwasser und Feststoffe (OWF)

Im Sachgebiet Oberflächenwasser werden die Wasserstände, Durchflüsse und Wassertemperatur geprüft. Das Schwebstoffmessnetz befindet sich noch im Aufbau.

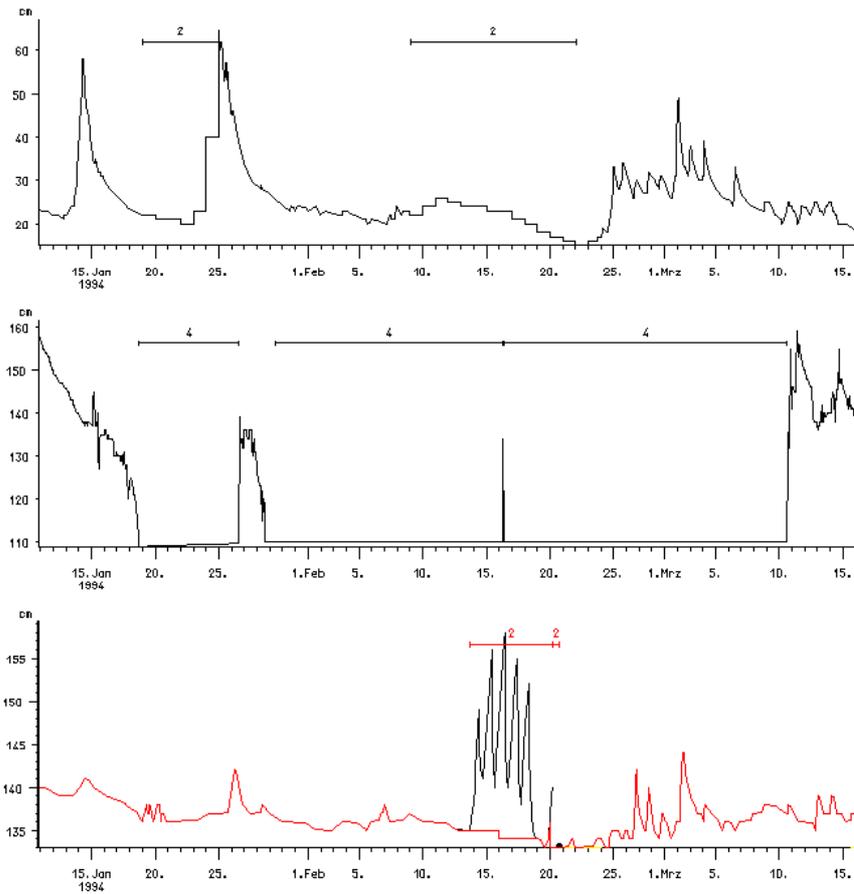
Die Wasserstände werden hinsichtlich fehlerhafter Werte bzw. Ganglinienverläufe korrigiert und Datenlücken gefüllt. Anhaltspunkte dafür geben die regelmäßig durchzuführenden Kontrollmessungen, die Ablesungen von Beobachtern und der Vergleich mit benachbarten Messstellen. Fehlende Datenbereiche werden mit Hilfe der Daten benachbarter Stationen rekonstruiert (Abb. 6).



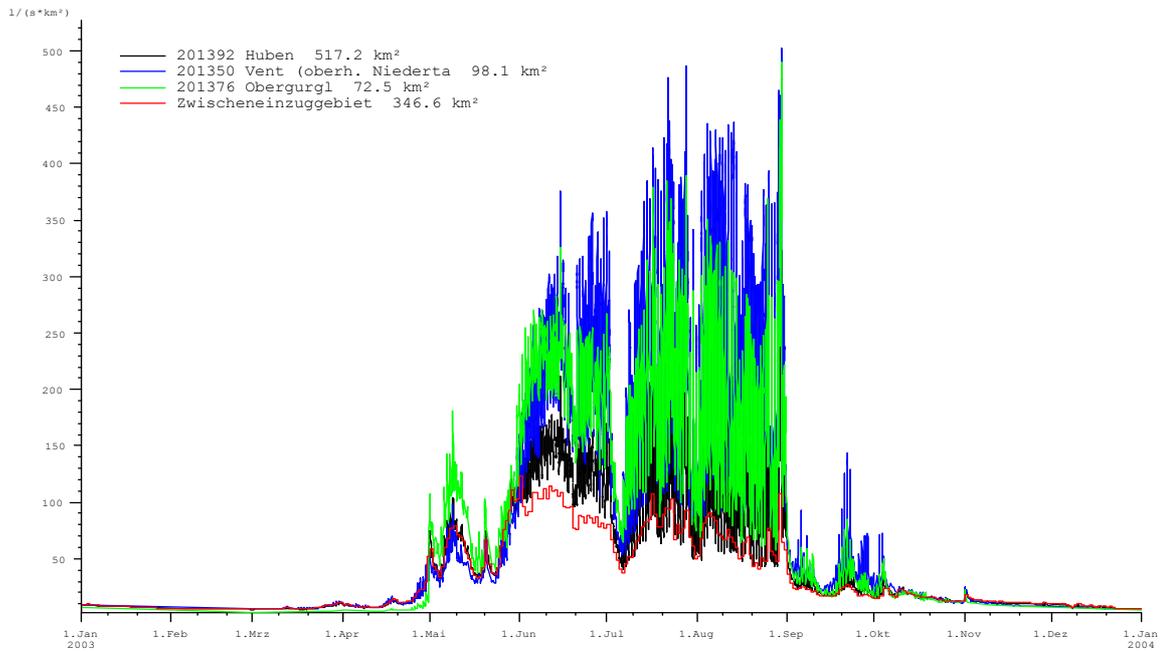
**Abb. 6:** Korrektur fehlerhafter Wasserstände und Rekonstruktion fehlender Daten mit Hilfe von Messungen, Kontrollablesungen und Daten einer benachbarten Messstelle

Das Hydrographische Daten-Management-System erlaubt es, über ein Qualitätsstufenkonzept korrigierte oder ergänzte Daten als solche zu kennzeichnen. Außerdem werden Codes vergeben oder Anmerkungen angebracht, die auf eine Beeinflussung einzelner Messwerte oder Zeitabschnitte durch Eis, Verkrautung oder auf ein Trockenfallen der Messstelle hinweisen. In Abb. 7 sind in der Achsbox A und C Zeitreihen dargestellt, deren Beobachtung durch Eisbildung (Codierung mit einem Textintervall „2“) beeinträchtigt war. Die Achsbox B zeigt eine Zeitreihe, die über einen angegebenen Zeitraum trockengefallen ist (Codierung mit „4“). Eine Markierung mit dem Code „3“ würde für Zeitbereiche stehen, in denen eine Beeinträchtigung durch Verkrautung vorlag. Achsbox C verdeutlicht auch ein Beispiel, wie ein durch Eisaufstau entstandener - falscher - Wasserstand korrigiert, d.h. „reduziert“ wird.

Bei der Umsetzung der gemessenen Wasserstände in Durchflüsse über die Wasserstands-Durchfluss-Beziehung dienen Ergebnisse der regelmäßig durchzuführenden Durchflussmessungen als Anhaltspunkt. Die ermittelten Durchflüsse werden anschließend einer strengen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Das geschieht über eine Bilanzierung der Durchflüsse von Ober- und Unterlieger bzw. Zubringer (Abb. 8). Zusätzlich werden die monatlichen Spenden mit den mittleren Spenden der zurückliegenden 5 Jahre verglichen.



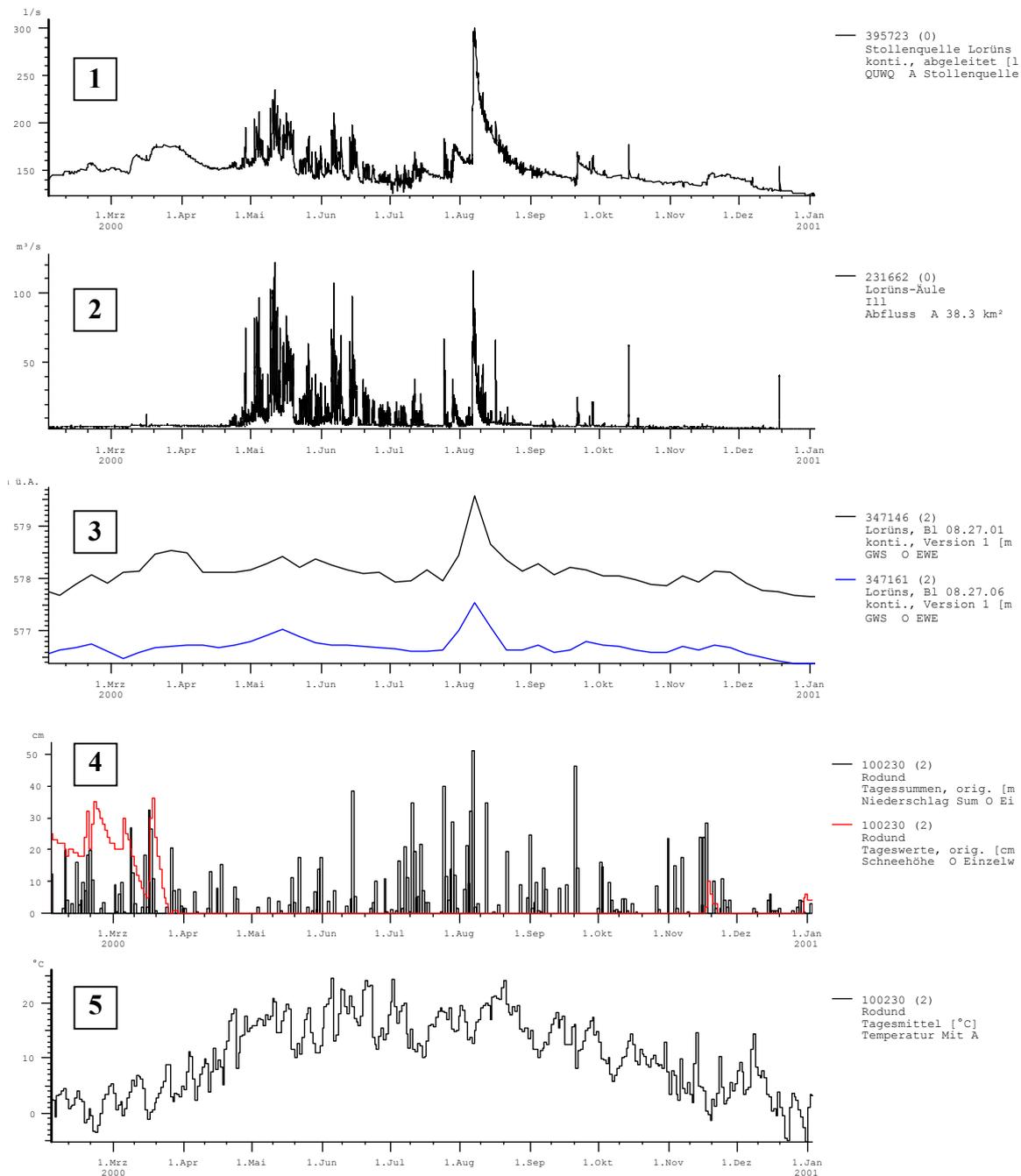
**Abb. 7:** Beispiele für die Kennzeichnung von durch Eis und Trockenfallen beeinträchtiger Wasserstände



**Abb. 8:** Beispiel für die Plausibilisierung von Durchflüssen anhand der Bilanzierung

### 2.2.3 Beispiel für die Datenprüfung im Sachgebiet Unterirdisches Wasser einschließlich Quellen (UWQ)

Die unter 2.2 genannten grundsätzlichen Arbeitsschritte für die Prüfung und Korrektur der Daten gelten auch für dieses Sachgebiet. Eine Besonderheit stellen die Quellen dar, wo Datenlücken nicht geschlossen werden. Abb. 9 enthält ein Beispiel, wie anhand der Gegenüberstellung von Quellschüttung, Grundwasserstand, Wasserstand im Fließgewässer, Niederschlag und Lufttemperatur die Plausibilität überprüft werden kann.



**Abb. 9:** Plausibilisierung der Quellschüttung (1) mit Hilfe des Wasserstandes im Fließgewässer (2), von Grundwasserständen (3), Niederschlag und Schneehöhe (4) und Lufttemperatur (5)

### 2.2.4 Ermittlung erster Kennwerte

Im Zuge der Datenprüfung und der Vorbereitung der Veröffentlichung werden die gewonnenen Daten einer ersten Auswertung und Bildung von statistischen Kennwerten unterzogen. Das betrifft im Wesentlichen die Bildung von Summen, Tages-, Monats- und Jahresmittelwerten, Minima, Maxima, Haupt- und Dauerzahlen und den Vergleich mit den Werten langjähriger Reihen (BMLFUW 2001). Diese Auswertungen sind in den Tabellen des Hydrographischen Jahrbuches (z.B. BMLFUW, 2005a) enthalten.

### 2.3 Datenveröffentlichung

Die primäre Publikationsform der hydrographischen Daten sind die Hydrographischen Jahrbücher, die seit 1893, dem Gründungsjahr des Hydrographischen Dienstes in Österreich, jährlich publiziert werden (Abb. 10).

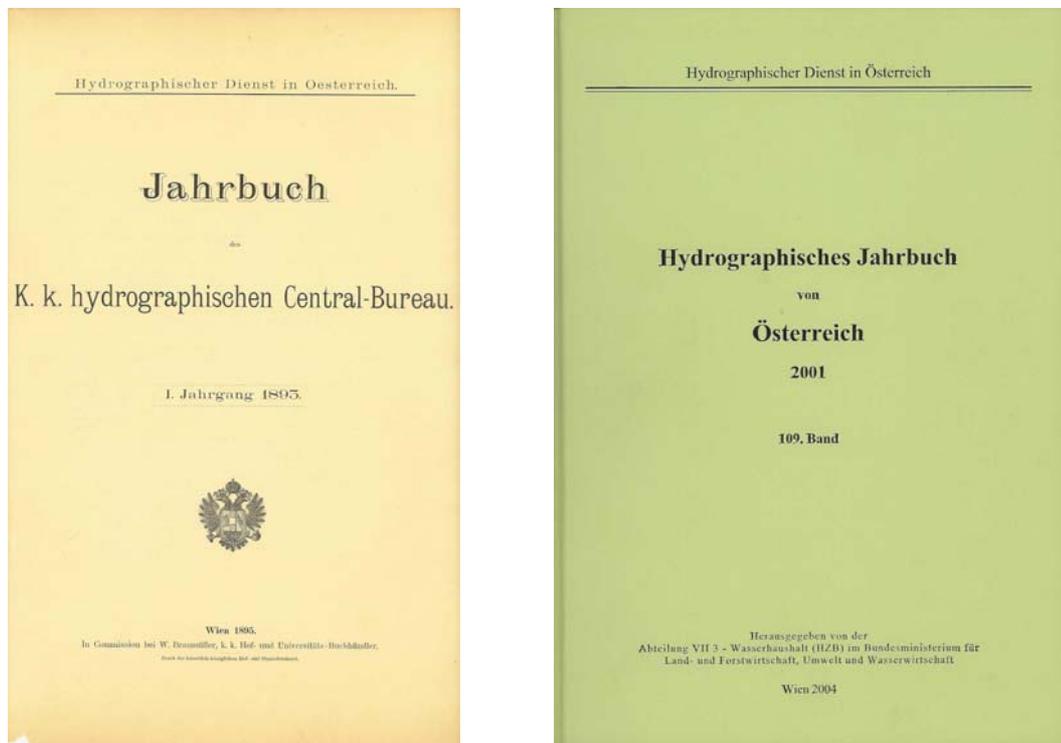


Abb. 10: Hydrographisches Jahrbuch 1893 und 2001

Mit Veröffentlichung der Daten des Jahres 2002 (BMLFUW, 2005a) wurden das äußerliche Erscheinungsbild modernisiert und eine Daten-CD-ROM hinzugefügt, welche alle Tabellen des Jahrbuches in Form elektronischer Dokumente (pdf-Format) enthält (Abb. 11). Die Übersichtskarte der Messstellen und der Beobachtungsgebiete wurde auf einen benutzerfreundlichen Maßstab reduziert und an die kartographische Qualität des Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW, 2003, 2005) angepasst. Der neue Maßstab erforderte eine Aufteilung der ursprünglichen Messstellenkarte in drei Karten, die jeweils die im Jahrbuch veröffentlichten Messstellen der Sachgebiete NLV, OWF und UWQ enthalten.



Abb. 11: Neu gestaltetes Hydrographisches Jahrbuch für Österreich ab dem Abflussjahr 2002 (110. Band) mit beiliegender Daten-CD-ROM

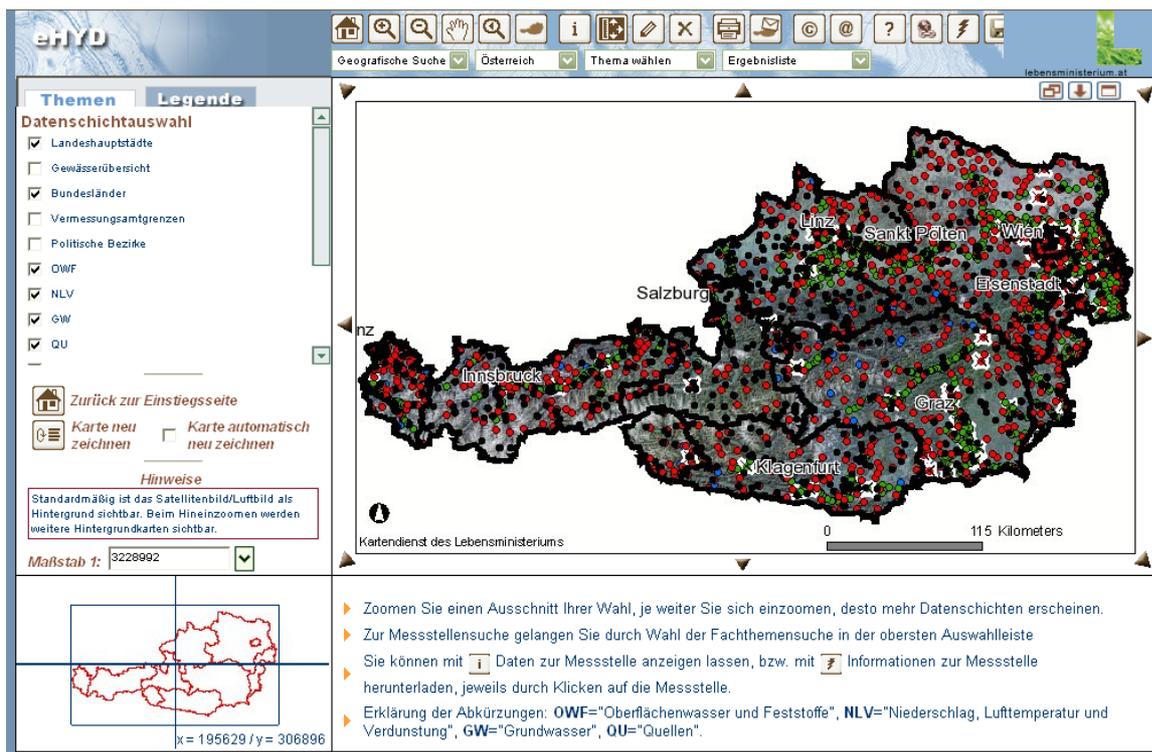


Abb. 12: Startfenster der Internetplattform eHYD – Hydrographische Daten im Internet

Darüber hinaus bietet die Abteilung VII3 – Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro) über die Internet-Plattform eHYD (<http://geoinfo.lfrz.at/eHYD>) eine Auswahl charakteristischer Zeitreihen bis einschließlich des letzten im Jahrbuch veröffentlichten Jahres digital zum Download an (Abb. 12). Zunehmend stellt der Hydrographische Dienst auch online-Informationen (Rohdaten!) im Internet bereit.

### 3. Verfügbarkeit der Daten für Nutzer

Die hydrographischen Daten Österreichs sind neben den im Hydrographischen Jahrbuch und im Internet veröffentlichten Daten grundsätzlich auch direkt bei den Hydrographischen Landesdiensten bzw. der Abteilung VII3 Wasserhaushalt (HZB) im BMLFUW beziehbar und können Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Die folgenden Tabellen 1 bis 3 geben einen Überblick über die digital verfügbaren Daten:

**Tab. 1:** Übersicht über die beim Hydrographischen Dienst in Österreich digital verfügbaren Daten des Sachgebietes Atmosphärischer Bereich (NLV)

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen
Niederschlag	ab 1971	Tagessumme
	ab 1881	Monatssumme
	ab 1901	Größte Niederschlagtagessumme pro Jahr
	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr in Niederschlagshöhenklassen
NPerioden	ab 1971	Anzahl von Niederschlagsperioden in Dauerklassen pro Jahr / Vegetationsperiode
Trockenperioden	ab 1951	Anzahl von Trockenperioden in Dauerklassen pro Jahr / Vegetationsperiode
Neuschnee	ab 1971	Tagessumme
	ab 1901	Jahressumme*
Schneefall	ab 1901	Anzahl der Tage mit Neuschnee pro Jahr*
Schneehöhe	ab 1971	Tageswert
	ab 1901	Größte Schneehöhe pro Jahr*
	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr* mit Schneehöhen in bestimmten Schneehöhenklassen
Schneedecke	ab 1901	Erster und letzter Tag mit Schneehöhe pro Jahr*
Winterdecke	ab 1901	Beginn und Ende des längsten Zeitraumes mit geschlossener Schneedecke pro Jahr*
Schneewasserwert	ab 1998	Momentanwert
Schneedichte	ab 1998	Momentanwert
Lufttemperatur	ab 1998	Terminwerte und Tagesmittel
	ab 1901	Monatsmittel; größtes Tagesmittel pro Jahr; kleinstes Tagesmittel pro Jahr
	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr mit Tagesmittel in bestimmten Temperaturklassen

\* Der Beobachtungszeitraum für ein Jahr reicht vom 1. September des Vorjahres bis zum 31. August des Jahres.

**Tab. 2:** Übersicht über die beim Hydrographischen Dienst in Österreich digital verfügbaren Daten des Sachgebietes Oberflächenwasser und Feststoffe (OWF)

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen
Wasserstand	ab 1976	in Abhängigkeit vom Zeitreihenarchiv als Terminwerte oder als kontinuierliche Zeitreihe
Abfluss	ab 1951	als Tagesmittelwerte, Monatsminima und Monatsmaxima
	ab 1976	als kontinuierliche Zeitreihe
Wassertemperatur	ab 1976	in Abhängigkeit vom Zeitreihenarchiv als Terminwerte oder als kontinuierliche Zeitreihe

**Tab. 3:** Übersicht über die beim Hydrographischen Dienst in Österreich digital verfügbaren Daten des Sachgebietes Unterirdisches Wasser einschließlich Quellen (UWQ)

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen
Grundwasserabstich	ab 1966	wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen
Grundwasserstand	ab 1966	kontinuierlich: wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen
	ab 1930	Monatsmittel
Grundwassertemperatur	ab 1966	wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen
Grundwassertemperaturprofil	ab 1985	monatliche Messungen
Quellwasserstand	ab 1995	kontinuierliche Messungen, 15-min-Mittelwerte
Quellschüttung	ab 1995	kontinuierliche Messungen, 15-min-Mittelwerte
Quellwassertemperatur	ab 1995	kontinuierliche Messungen, 15-min-Mittelwerte
Quellwasserleitfähigkeit	ab 1995	kontinuierliche Messungen, 15-min-Mittelwerte
Quellwassertrübung	ab 1995	kontinuierliche Messungen, 15-min-Mittelwerte

#### 4. Schlussbemerkung

Unter Nutzung der Daten des Hydrographischen Dienstes in Österreich wurden in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten zur Regionalisierung durchgeführt. Viele von ihnen fanden Eingang in den Hydrologischen Atlas Österreichs (BMLFUW 2003, 2005). Weiters sei auf die Beiträge in diesem Band verwiesen.

Die Variabilität der Naturvorgänge kann nur mit langen Messzeitreihen erfasst werden. Diese Tatsache gewinnt vor dem Hintergrund der Klimaänderungen und der

Auswirkungen auf den Wasserkreislauf um so mehr an Bedeutung. Auch im Zusammenhang mit den Anforderungen durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie steigt der Bedarf nach aktuellen fundierten Daten, deren Auswertung und Verwertung, z.B. mit Hilfe der Regionalisierung. Klug konzipierte Messnetze, die qualitativ und quantitativ gute Daten liefern, sind eine wichtige Basis dafür. Methoden der Regionalisierung können wiederum helfen, Umfang, räumliche Anordnung und zeitliche Auflösung der Messungen und Beobachtungen zu optimieren, aber sie können die hydrologischen Messnetze nicht ersetzen. Messen und Beobachten und Regionalisieren müssen sich ergänzen.

## 5. Literatur

Becker, A. (1992) Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Regionalisierung in der Hydrologie. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft

BMLFUW (ed.) (2001) Pegelordnung – Richtlinien für Messungen an Pegeln oberirdischer Gewässer. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

BMLFUW (ed.) (2003, 2005) Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung 2003. 2. Lieferung 2005. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

BMLFUW (ed.) (2005a) Hydrographisches Jahrbuch von Österreich. 110. Band 2002. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

BMLFUW (ed.) (2005b) Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich. Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros, Heft 70, Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

Godina, R. (2002) Überblick über Daten und Datenarchive im Hydrographischen Dienst für Österreich. In: Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Simulation und Prognose. Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer, Band 164, S.119-128, Wien

### **Anschrift der Verfasserin:**

Dr. Gabriele Müller

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,  
Abteilung VII3 Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro)

Marxergasse 2

1030 Wien

Tel. +43 1 71100 6930, Fax +43 1 71100 6851

e-mail: gabriele.mueller@lebensministerium.at



## REGIONALISIERUNG DES NIEDERSCHLAGS

Viktor Weilguni

### 1. Einleitung

Die Übertragung einer Größe auf ein unbeobachtetes Gebiet wird als Regionalisierung bezeichnet. Der Begriff Regionalisierung kann somit auch mit dem Begriff der räumlichen Interpolation von Werten gleichgesetzt werden. Diese Übertragungen werden benötigt, um Aussagen zu der Größe an unbeobachteten Orten zu erhalten, räumliche Verteilungen zu beschreiben oder räumlich gemittelte Größen in einem Gebiet abzuleiten, wie z.B. den Gebietsniederschlag.

Die Regionalisierung des Niederschlags bereitet größere Schwierigkeiten, als die anderer Klimaelemente, da der Niederschlag eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen kann, was vor allem bei schauerartigen Niederschlägen und Gewittern mit sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen auf eng begrenztem Raum deutlich wird. Ein Teil dieser räumlichen Variabilität des Niederschlags wird häufig von der Orographie mitbestimmt, woraus sich aber auch die Möglichkeit ergibt, bei Kenntnis des Einflusses der Orographie auf das Verhalten des Niederschlags, diesen zwischen den Messpunkten abzuschätzen.

Grundsätzlich ist die Niederschlagsverteilung von der großräumigen synoptischen Situation abhängig (Hoch- und Tiefdruckgebiete, großräumige Strömung), die lokal modifiziert werden können, z.B. durch die Änderungen der (thermischen) Stabilitätsbedingungen der Atmosphäre (z.B. durch Einstrahlung, Hitzegewitter) oder auch von der Orographie (z.B. Stauniederschlag, Niederschlagsabschattungseffekte). Diese unterschiedlichen Einflussgrößen sind in komplexer Weise miteinander verknüpft. Je kürzer die Zeitskala ist, die betrachtet wird z.B. Stundensummen, Tagessummen, umso komplexer können die Bedingungen sein, die das Niederschlagsverhalten mitbestimmen, und umso schwieriger wird es räumlich zu interpolieren. Ein systematisches räumliches Verhalten ist nicht immer feststellbar. Im Gegensatz dazu gelingt es umso besser, je länger der Zeitraum wird den man betrachtet, z.B. Monate, ein mittleres räumliches Verhalten des Niederschlags, das mit der Orographie (Seehöhe, Hangneigung) korreliert ist, und abhängig von der Jahreszeit sein kann, zu erkennen. Somit ist für die Wahl der Interpolationsmethode der betrachteten Zeitskala der Niederschlagswerte, neben dem Niederschlagstyp (schauerartige Niederschläge, Landregen), und natürlich der Grad der räumlichen Gliederung des Geländes von Bedeutung. Je kürzer die Niederschlagsdauer ist und je komplexer das Gelände, umso schwieriger wird die Interpolation, und umso detailreichere Zusatzinformationen, die das Niederschlagsverhalten zwischen den Messstellen beschreiben, sind notwendig, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Methoden für die Interpolation von Kurzzeitniederschlägen und danach für Niederschläge längerer Dauerstufe beschrieben. Auf die Regionalisierung von abgeleiteten Niederschlagsgrößen, wie z.B.

extremer Tagesniederschläge, wird nicht eingegangen, sondern nur auf Messwerte bzw. gemittelte Messwerte, die gleichzeitig beobachtet werden.

## **2. Methoden der Niederschlagsregionalisierung**

Es stellt sich relativ rasch heraus, dass ohne Zusatzinformationen aus den Messstellendaten alleine eine Niederschlagsinterpolation nur in Ausnahmefällen zu brauchbaren Ergebnissen führt. Die Ausnahmen sind vor allem in topographisch nicht (kaum) gegliederten Gelände, und bei hoher Stationsdichte zu erwarten.

### **2.1 Regionalisierung ohne Zusatzinformationen**

Zur Abschätzung von räumlichen Mittelwerten ist die Methode der „Arithmetische Mittelbildung“ der Messstellendaten als erste Schätzung weit verbreitet. Diese liefert vor allem dann brauchbare Ergebnisse, wenn nur relative Aussagen interessieren, wie z.B. die mittlere Jahresniederschlagssumme in Prozent von einem langjährigen Mittelwert, der auf die gleiche Weise gewonnen wurde.

Die Methode der „Thiessen-Polygone“ ist eine weitere Möglichkeit Mittelwerte abzuschätzen. Hierbei werden den Messstellendaten aufgrund ihres Einflussbereiches Gewichte zugeordnet, die bei der Mittelbildung berücksichtigt werden. Es ist ein rein geometrisches Verfahren bei dem die Gewichtung der Messstellendaten praktisch durch die Stationsdichte festgelegt wird. Auch hier bleiben topographische Einflüsse unberücksichtigt.

Soll die räumliche Verteilung beschrieben werden, bedeutet das Interpolation der Daten auf ein Gitternetz. Hierzu sind die unterschiedlichsten Methoden möglich, wie sie z.B. bei Blöschl und Merz (2002) diskutiert wurden. Diese können in deterministischen und statistischen Methoden eingeteilt werden.

Als Beispiel für deterministische Methoden sei z.B. die Thiessen– Methode („Nächster Nachbar“) angeführt, bei der für jeden Gitterpunkt der nächstgelegene Messwert verwendet wird. Weitere Interpolationsmethoden sind jene mit Distanzgewichtung, Anpassung von Polynomen oder, Spline–Funktionen.

Bei den statistischen Interpolationsverfahren sei z.B. Kriging erwähnt, bei der aus der räumlichen Korrelation der Messwerte die Messstellengewichte für die Interpolation abgeleitet werden. Der Gitterpunktswert wird dann als gewichtetes Mittel erhalten.

### **2.2 Regionalisierung mit Zusatzinformationen**

Bei der Beschreibung der Regionalisierungsmethoden mit Zusatzinformation wird zwischen Niederschlägen kurzer Dauer und länger dauernden Niederschlägen (Monat und länger) unterschieden. Dies deswegen, da je kürzer die Niederschlagsdauer ist, umso „chaotischer“, im Sinne von räumliche variabel, kann die Niederschlagsverteilung sein (Schauer, Gewitter). Für die Interpolation bedeutet das, dass detailreichere Zusatzinformationen erforderlich werden, als bei den Niederschlägen längerer Dauer. Bei der Auswahl der einzelnen Beispiele wurde darauf

geachtet, dass unterschiedliche Methoden mit unterschiedlichen Zusatzinformationen beschrieben werden.

### **2.2.1 Regionalisierung von Niederschlägen kurzer Dauer**

#### **Zusatzinformation - Radar**

Eine Interpolationsmethode für Kurzzeitniederschläge wurde und wird an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) entwickelt. Sie ist ein Teil eines Kurzzeitvorhersageprogramms (vom „Nowcasting“ Bereich bis zu 12 Stunden), welches neben Topographiedaten auch Radardaten, Satellitendaten und numerische Vorhersagedaten als Zusatzinformationen mit einbezieht, und die Bezeichnung INCA (Integrated Nowcasting through, Comprehensive Analysis) trägt (Haiden et al., 2006). In diesem Programmmodul werden nicht nur Aussagen zu Niederschlag sondern auch zu Temperatur, Luftfeuchte, Wind und Bewölkung gemacht und abgeleitete Größen wie z.B. die Höhe der Schneefallgrenze berechnet.

Diese Berechnungen erfolgen auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 1 km. Zur Niederschlagsinterpolation werden neben den Beobachtungsdaten als Zusatzinformation Radardaten verwendet, die ebenfalls auf einem 1 km Raster vorliegen. Der Vorteil von Radardaten liegt darin, dass sie „direkte“ Informationen über das flächige Niederschlagsverhalten liefern und somit auch Informationen zwischen den Messpunkten. Derzeit werden für die Niederschlagsinterpolation 2-dimensionale Bilder mit Maximumwerten für jede Säule in 14 Intensitätsklassen verwendet, die in 5 Minuten Zeitschritten vorliegen.

Das Problem bei Radarinformationen liegt einerseits in der Unsicherheiten mit der die Informationen in tatsächlich gefallenen Niederschlagsmengen umgerechnet (kalibriert, angeeicht) werden können, und in der nicht flächendeckend Verfügbarkeit. Die Radardaten stammen von den vier Radaranlagen die von der Austro Control betrieben werden: Wien (Flugplatz), Salzburg, Innsbruck (Patscherkogel) und im Nordosten von Kärnten (Zribitzkogel).

Die zeitliche Auflösung der Niederschlagsdaten, die für die Analyse benötigt werden, beträgt 15 Minuten. Die Radardaten, werden auf das 1 km Gitter interpoliert und 15 Minuten Radarniederschlagssummen gebildet.

Die Niederschlagsmessdaten stammen von Teilautomatischen Wetterstationen der ZAMG und von Messstellen mit Datenfernübertragung des Hydrographischen Dienstes. Für die räumliche Interpolation der Niederschlagsmessungen auf das 1 km Gitter, wird eine distanzgewichtete Methode angesetzt, wobei das Gewicht indirekt proportional der Entfernung ist, die mit dem Exponent nahe 2 eingeht.

Der Radarniederschlag (Radarinformation) wird nun mit den Niederschlagsmessungen kalibriert. Dies geschieht auf zwei Arten: einmal mit einer „klimatologischen“ Kalibrierung und danach wird der Radarniederschlag mit einer Kalibrierung anhand von aktuellen Beobachtungswerten durchgeführt.

Die klimatologische Kalibrierung setzt auf Monatsniederschlagssummen auf. Für jeden Monat wird für jede Messstelle ( $k$ ) ein Kalibrierungsfaktor  $RFC$  berechnet, der

auf die Gitterpunkte interpoliert wird. Der Kalibrierungsfaktor ist das Verhältnis der Monatsniederschlagssumme an der Messstelle  $P(k)$  zur jener aus den Radarbildern  $P_{RADAR}(k)$ .

$$RFC(k) = \frac{\sum_{month} P(k)}{\sum_{month} P_{RADAR}(k)} \quad (1)$$

Danach wird für jeden Monat ein Mittelwert des klimatologischen Kalibrierungsfaktors aus dem Monatswert selbst und den Werten der angrenzenden Monate gebildet.

Zusätzlich wird ein lokaler (klimatologischer) Kalibrierungsfaktor  $RFC_l$  bestimmt, der als Verhältnis der Monatssummen der interpolierten Messstellenniederschlägen  $P_{STAT}(i, j)$ , zu den Monatssummen der Radarniederschlägen  $P_{RADAR}(i, j)$  an jedem Gitterpunkte definiert wird. Dies deswegen, um Gebiet mit nichtverwertbaren Radardaten, wie sie z.B. durch Abschattung des Radarstrahl entstehen, zu berücksichtigen.

$$RFC_l(i, j) = \frac{\sum_{month} P_{STAT}(i, j)}{\sum_{month} P_{RADAR}(i, j)} \quad (2)$$

In Abb. 1 ist der mittlere klimatologischer Kalibrierungsfaktor für die Monate Mai bis August 2005 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in weiten Teilen von Westösterreich die Überdeckung mit Radarinformation ziemlich schlecht ist (Werte größer 5) und somit die Radarinformationen dort keine Verbesserung der Niederschlagsinterpolation erwarten lassen.

Das resultierende klimatologisch kalibrierte Radarniederschlagsfeld  $P_{RADAR}^*$  an jedem Gitterpunkt ergibt sich dann aus Multiplikation des höheren Kalibrierungsfaktors  $RFC_{max}(i, j)$  aus  $RFC$  oder  $RFC_l$  mit dem Radarniederschlag.

$$P_{RADAR}^*(i, j) = RFC_{max}(i, j) P_{RADAR}(i, j) \quad (3)$$

Zwei Problemfälle werden dabei berücksichtigt. Für solche Gebiete in denen das Radarsignal schwach oder durch Abschattung nicht vorhanden ist (hohe Kalibrierungsfaktoren), wird der maximale Wert des Kalibrierungsfaktors auf 5 gesetzt, um eine zu starke Skalierung der Radardaten die fragwürdige Niederschläge produzieren könnte, zu vermeiden

Ein zweiter Fall ist der für konvektive Niederschläge mit hohen Niederschlagsraten, die vom Radar weniger unterschätzt werden, als die anderen Niederschläge. Um eine Überkalibrierung für hohe Niederschlagsintensitäten zu vermeiden, wird für Niederschlagsintensitäten von mehr als 2,5mm/15 Minuten (RR\_CR) der Kalibrierungsfaktor so transformiert, dass er für sehr hohe Niederschläge gegen 1 geht (Anm.: dadurch werden die Radarniederschläge den Messwerten gleichgesetzt.)

$$RFC_{\max}(i, j) = 1 + (RFC_{\max}(i, j) - 1) \frac{RR - CR}{P_{RADAR}(i, j)} \quad (4)$$

Der zweite Kalibrierungsschritt erfolgt mit den aktuellen Niederschlagsdaten (15 Minutensummen).

Dazu wird an den Messstellen das Verhältnis von gemessenen Niederschlag zum klimatologisch kalibrierten Radarniederschlag gebildet, wobei für jede Messstelle jenes Radarpixel innerhalb eines 2 km Radius gesucht wird, das die beste Übereinstimmung mit dem Beobachtungswert hat. Dadurch werden einerseits Windverfrachtungen des Niederschlags bzw. die Fallverzögerung des Niederschlags zum Boden gegenüber dem Radarsignal berücksichtigt. Dieser Kalibrierungsfaktor RFCMESS wird dann auf die Gitterpunkte distanzgewichtet interpoliert, und dort der kalibrierte Radarniederschlag  $P_{RADAR}^{**}$  gebildet

$$P_{RADAR}^{**}(i, j) = RFC_{MESS}(i, j) P_{RADAR}^*(i, j) \quad (5)$$

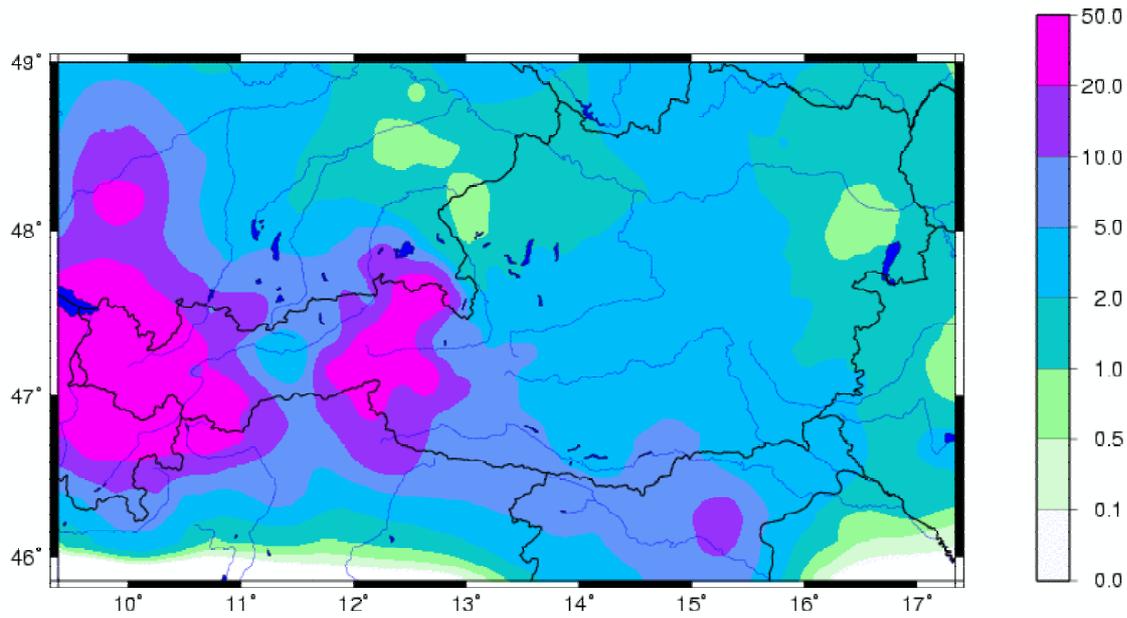
Diese beiden Niederschlagsfelder, der interpolierte Messstellenniederschlag  $P_{STAT}(i, j)$  und der kalibrierte Radarniederschlag  $P_{RADAR}^{**}(i, j)$  werden nun zum Ergebnisniederschlag  $P_{INCA}(i, j)$  kombiniert. Als Endergebnis wird folgender Ansatz verwendet

$$P_{INCA}(i, j) = P_{STAT}(i, j) + [P_{RADAR}^{**}(i, j) - P_{RADSTAT}^{**}(i, j)] \quad (6)$$

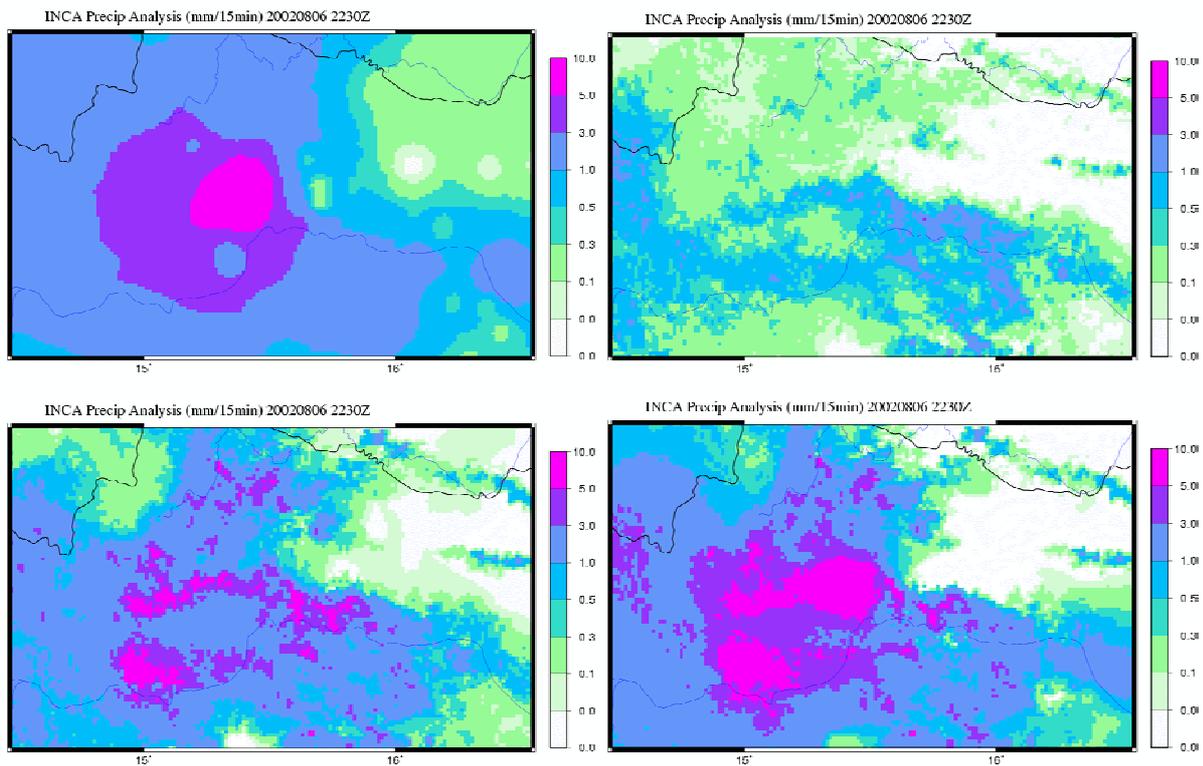
$P_{RADSTAT}^{**}(i, j)$  ist das auf die Gitterpunkte distanzgewichtete interpolierte Feld der kalibrierten Radarniederschläge an den Messstellen (an den Messstellen ist  $P_{RADSTAT}^{**} = P_{RADAR}^{**}$ ). Die Differenz zwischen  $P_{RADAR}^{**}(i, j)$  und  $P_{RADSTAT}^{**}(i, j)$  gibt an, wie stark die lokalen Radarniederschläge von den Radarniederschlägen, abgeleitet von den nächstgelegenen Messstellen, abweichen.

Beispielhaft sind in der Abb. 2 die Auswirkungen der Schritte bei der Anwendung der Interpolationsmethode für das Kampeinzugsgebiet veranschaulicht. Es zeigen sich sinnvolle Strukturen der interpolierten Niederschläge.

Als Einschränkung muss nochmals erwähnt werden, dass diese Interpolationsmethode nur in diesen Gebieten eine Verbesserung ermöglicht, in denen auch ausreichende Radarinformationen vorliegen. Aus Abb. 1 ist zu erkennen, dass für weite Teile von Westösterreich keine brauchbaren Radarinformationen zur Verfügung stehen. INCA wird derzeit z.B. für die Abflussvorhersagemodelle von Kamp und Donau operationell genutzt.



**Abb. 1:** Mittlerer klimatologischer Kalibrierungsfaktor für die Monate Mai bis August 2005 (Haiden et al., 2006).



**Abb. 2:** Beispiel für eine Niederschlagsinterpolation von 15 Minuten mit INCA. Oben links: interpolierte Messstellenniederschlag, oben rechts: Radarniederschlag, unten links: kalibrierter Radarniederschlag, unten rechts: Ergebnis der INCA-Niederschlagsinterpolation (Haiden et al., 2006).

### **Zusatzinformation – Konzeptionelles (physikalisches) Modell**

Ein Interpolationsschema, das schon sehr erfolgreich auf andere Klimaelemente (z.B. Luftdruck, Temperatur, Wind) angewendet wird, heißt VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis). Die Methode wurde 1995 am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Wien (IMG) entwickelt, und seither laufend weiterentwickelt.

VERA ist ein objektives, Analyseverfahren meteorologischer Daten über komplexer Orographie. Es können Strukturen aufgelöst werden, die kleiner als die Skala des mittleren Stationsabstandes sind, indem Zusatzinformationen (Vorwissen) über das Verhalten der Felder in die Analyse eingebracht werden. Diese Zusatzinformationen werden „Fingerprints“ genannt. Grundsätzlich besteht das Verfahren aus zwei Schritten:

Im ersten Schritt wird eine Fehlerkorrektur durchgeführt, die die einzelnen Messwerte auf ihre räumliche physikalische Konsistenz prüft (Messfehler, Übertragungsfehler). Dieser Schritt ist jedoch bei der Niederschlagsinterpolation nicht anwendbar, da durch diese Methode aufgrund der räumlich extrem inhomogenen Niederschlagsfelder, korrekte Messdaten ausgeschieden werden können.

Der zweite Schritt ist die Interpolation der Messwerte, für die ein Variationsansatz verwendet wird, der die Quadrate der räumlichen ersten und/oder zweiten Ableitungen des Messfeldes minimiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich Feldverteilungen so verhalten, dass ihre Krümmung minimiert wird, d.h. sich ein geglätteter Feldverlauf ergibt. Als Forderung an die Interpolation gilt, dass die interpolierten Werte mit den Werten an den Messstellen übereinstimmen.

Für den eindimensionalen Fall und für die 2. Ableitung kann die Gleichung hierfür folgendermaßen geschrieben werden

$$I(R) = \int [\partial^2 R / \partial x^2]^2 dx \quad \rightarrow \text{Minimum} \quad (7)$$

$R$ , der Niederschlag, der an den Messstellen gemessen wird bzw. der an die Gitterpunkte interpoliert werden soll, kann formal in zwei Teile aufgespalten werden (Steinacker et al., 2006).

$$R = R_S + c \cdot R_T \quad (8)$$

$R_S$  ist der synoptische Anteil des Niederschlags, der Anteil, der in der Druckverteilung, in der Feuchteverteilung ohne Vorhandensein eines Gebirges, einer gegliederten Topographie auftreten würde, und in einen Anteil  $R_T$ , den Fingerprint, der durch die Topographie bestimmt ist.  $R_T$  wird für idealisierte Bedingungen abgeleitet und liegt für jeden Punkt des topographischen Gitters vor. Während der Analyse, werden aus allen vorgegebenen Fingerprints diejenigen ausgewählt, die die beste Korrelation mit den Messdaten aufweisen und damit der Wert des Gewichtsfaktors  $c$  festgelegt.  $c$  kann sowohl räumlich, als auch von Fall zu Fall variieren, und beschreibt den Einfluss von  $R_T$  auf die aktuelle Niederschlagsverteilung.

Für die mathematische Lösung wird  $R_S$  in die Gleichung für  $I(R)$  eingesetzt, wodurch die Gleichung

$$I(R_S) = \int [\partial^2 / \partial x^2 (R - cR_T)]^2 dx \rightarrow \text{Minimum} \quad (9)$$

erhalten wird. Das bedeutet, nur für den für den synoptischen Anteil des Niederschlags wird die Bedingung eines glatten Feldverlaufs gefordert. Die interpolierten Werte an den Gitterpunkten werden durch die Lösung eines Gleichungssystems erhalten, das entsteht, wenn die Minimumbedingung angewendet wird. Das bedeutet, dass die Gleichung für  $I(R_S)$  an den Gitterpunkten nach  $R$  und  $c$  abgeleitet und 0 gesetzt wird.

Diese Fingerprints sind konzeptionelle Modelle, die die Physik, die hinter den thermischen bzw. dynamischen Prozessen steht, die den Niederschlag mitbestimmen, in mehr oder weniger idealisierte Weise beschreiben. Als Zusatzinformationen stehen zurzeit thermische (z.B. Hitzetief) und dynamische (z.B. Staukeil) Fingerprints zur Verfügung. An einem weiteren Fingerprint der den Stauniederschlag berücksichtigt, wird gearbeitet (Bica und Steinacker; 2005). Dabei wird angenommen, dass der Anteil des topographischen induzierten Niederschlags unter gesättigten Bedingungen durch die Gleichung

$$R_T = u(z) \cdot \tan \alpha \cdot q_s(0) \cdot \rho(0) \quad (10)$$

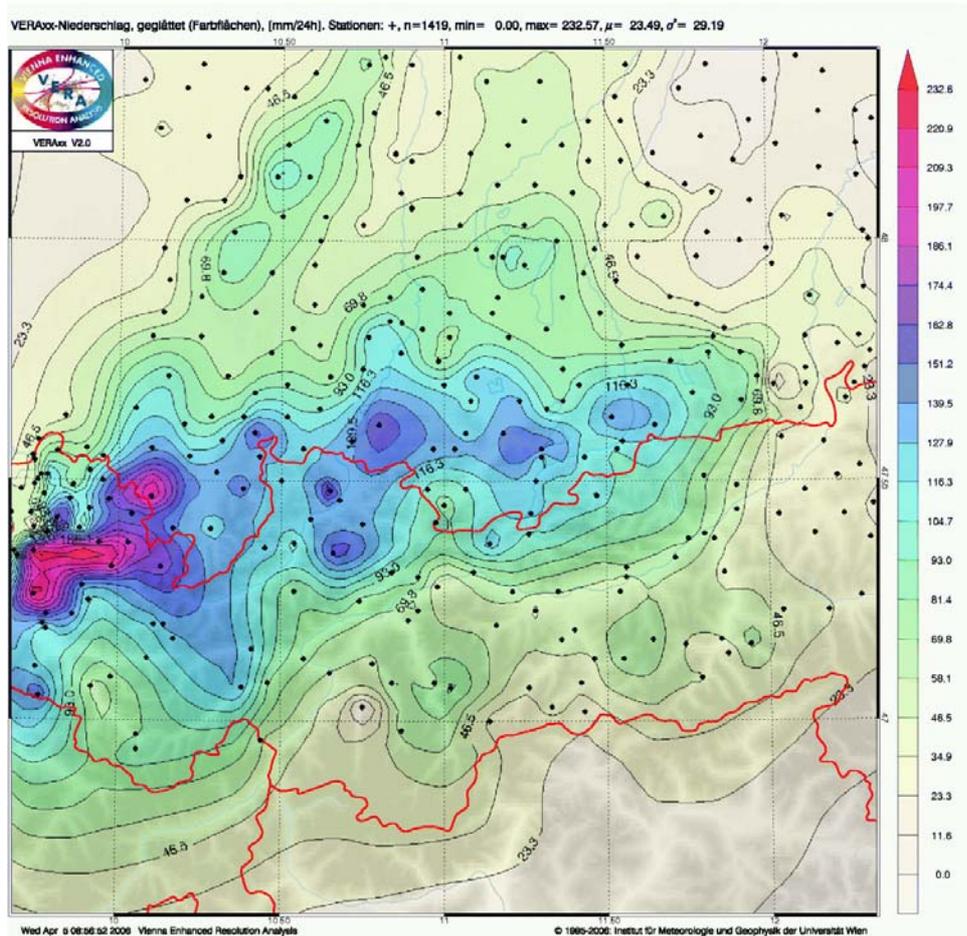
wiedergegeben werden kann.  $z$  ist die Höhe,  $u(z)$  die Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe  $z$ .  $\alpha$  kann z.B. für den eindimensionalen Fall, durch  $\frac{\partial z}{\partial x}$  beschrieben werden, der Neigung des Geländes an einem bestimmten Gitterpunkt.  $q_s(0)$  spezifische Sättigungsfeuchte bei  $z=0$  und  $\rho(0) = 1,226 \text{ kg/m}^3$ .

Unter der Annahme eines konstanten Wertes von  $u$  mit der Höhe, kann bei vorgegebenen  $q_s$  der topographisch induzierte Niederschlag  $R_T$  durch die Geländeneigung bestimmt werden. Das wird für die 8 Windrichtungen gemacht und für jeden Gitterpunkt abgelegt.

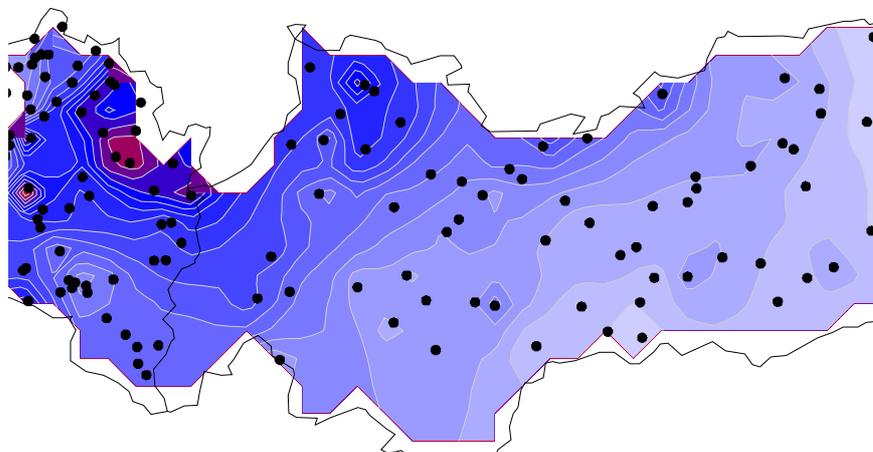
Probleme, die bei der Berücksichtigung der Topographie bei der Beschreibung der Niederschlagsverteilung auftreten, sind z. B. Niederschlags-Abschattungseffekte auf der Leeseite von Hindernissen (Bergen). Dabei bereiten vor allem aufeinander folgende Hindernisse Schwierigkeiten, die in Abhängigkeit von deren Ausdehnung und Entfernung unterschiedlich große Abschattungseffekte verursachen können. Zur Umgehung dieser Problematik wird die so genannten Transmountain Weighting Function (TWF) eingeführt. Diese Funktion ist abhängig von charakteristischen Längen, die einerseits die lokale Strömung und andererseits die großräumige Strömungssituation charakterisieren. Somit ist der Fingerprint des Strauniederschlags für einen Gitterpunkt proportional der Geländeneigung und einer Abschattungsfunktion (TWF).

Als Beispiel einer Anwendung zeigt Abb. 3 einen Ausschnitt einer VERA -Analyse für den Tagesniederschlag vom 22. August 2005, wobei jedoch „nur“ ein thermischer Fingerprint verwendet wurde. Die Gitterpunktsdistanzen betragen 2 km.

Gegenüber einer Niederschlagsinterpolation die durch inverse quadratische Distanzgewichtung entstanden ist, zeigt sich, dass vor allem der Bereich mit den maximalen Niederschlägen vergrößert wiedergegeben wird (vergleiche Abb. 4). Durch die Verwendung von des Fingerprints für den Stauniederschlag sollten weiter Verbesserungen möglich sein.



**Abb. 3:** VERA-Analyse des Tagesniederschlags vom 22 August 2005. Die verwendeten Niederschlagsmessstellen sind als Punkte gekennzeichnet (IMG).



**Abb. 4:** Tagesniederschlag vom 22 August 2005 interpoliert mit einer inversen quadratischen Distanzgewichtung (ähnlicher Isolinienabstand von 10mm wie in Abb. 3).

VERA –Analysen werden operationell von der Austro Control genutzt. Weiterentwicklungen von VERA, gerade auf dem Gebiet der Niederschlagsinterpolation gehen in die Richtung, dass abweichend vom ursprünglichen Konzept, nur von der Topographie abhängige Zusatzinformation zu verwenden, zu einem multivariaten Datenanalysemodell übergegangen wird, in dem z.B. auch Informationen über die Stabilität der Atmosphäre (Temperatur, Wind) und auch Radarbildinformationen genutzt werden.

### **Zusatzinformation – andere Niederschlagsmessdaten**

Ein weiteres Beispiel für Niederschlagsregionalisierung mit Zusatzinformationen, ist jene Methode die Merz et al. (2006) verwenden. Dabei werden Stundensummen des Niederschlags interpoliert, um daraus Gebietsniederschläge in Stundenauflösung ableiten zu können. Als Lieferant von Zusatzinformationen dienen Messstellen mit Niederschlagsmessungen in gröberer zeitlicher Auflösung (Tagessummen) aber wesentlich größerer räumlicher Dichte. So werden für ganz Österreich für den Zeitraum von 1981-2000, die Stundensummen von 143 Ombrographenmessstellen mit Hilfe der Tagessummen von 1066 Ombrometermessstellen auf die Ombrometermessstellen hin interpoliert und somit die Stundendaten räumlich stark verdichtet.

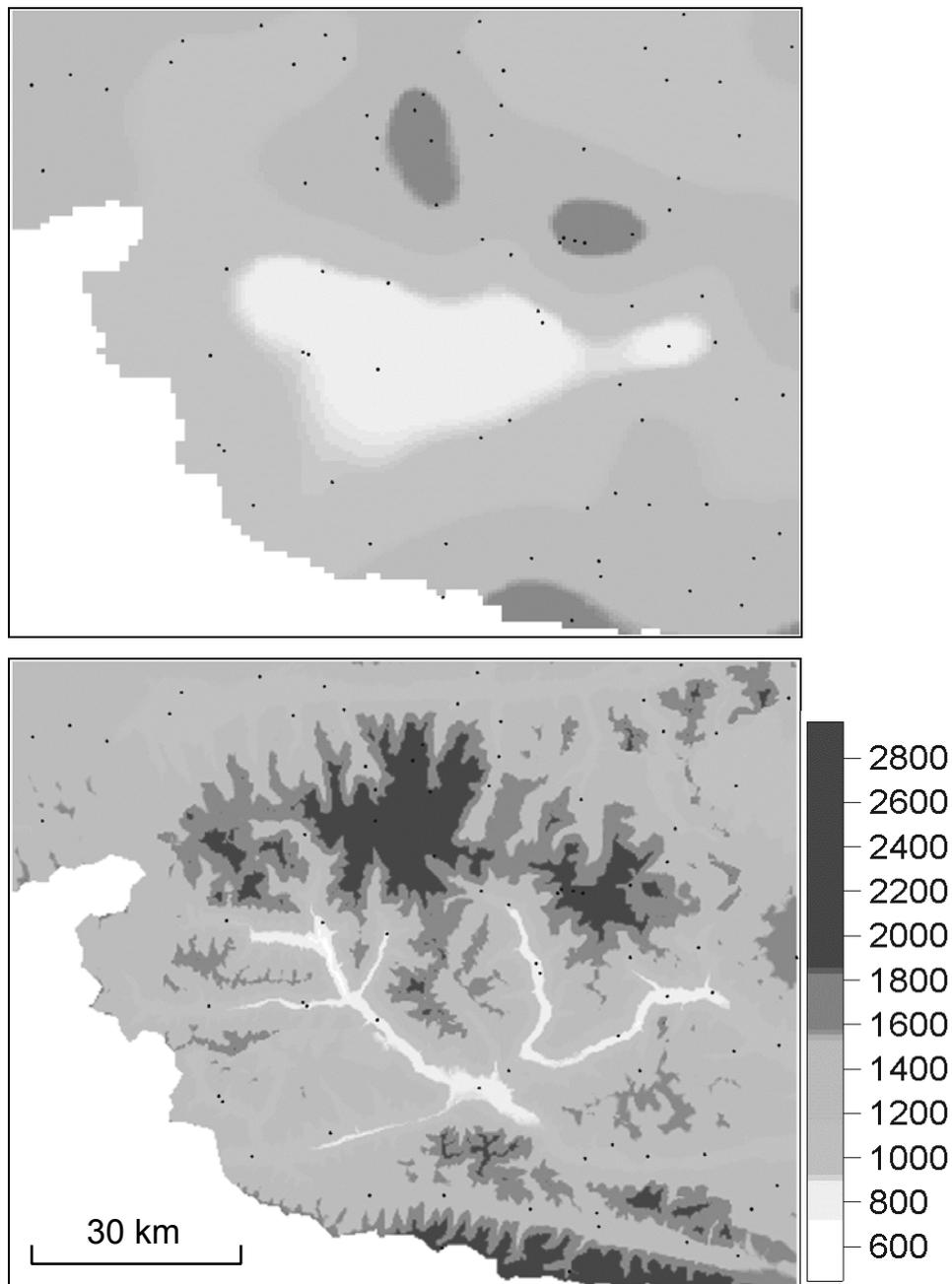
Zuerst werden die Stundensummen an den Ombrographenmessstellen mit der entsprechenden Tagesniederschlagssumme normiert. Danach werden für jede Ombrometermessstelle die normierten Stundensummen von den passenden vier nächstgelegenen Ombrographenmessstellen distanzgewichtet interpoliert. Dadurch erhält man an den Ombrometermessstellen interpolierte Stundensummen deren Tagessumme mit der dort gemessene Tagessumme übereinstimmt. Als passend werden jene vier Messstellen angesehen, die jede in einem anderen Quadranten eines rechtwinkligen nordorientierten Achsenkreuzes liegen müssen und dort die nächstgelegene zur Ombrometermessstelle, auf die interpoliert wird, ist. Als zweiter Schritt werden die Stundenwerte distanzgewichtet räumlich interpoliert um danach durch Verschneidung mit Einzugsgebietsgrenzen Gebietsniederschläge zu erhalten. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass auf Daten zurückgegriffen werden kann, die relativ leicht verfügbar sind.

### **2.2.2 Regionalisierung von Niederschlägen längerer Dauer (Monats-, Jahressummen)**

#### **Zusatzinformation – Seehöhe – Korrelation (Kriging)**

Ein Beispiel für ein statistisches Verfahren als Interpolationsmethode für die Jahresniederschlagssumme, geben Blöschl und Merz (2002) an, nämlich External Drift Kriging. Dabei wird angenommen, dass der Niederschlag perfekt mit der Zusatzgröße (Seehöhe) korreliert ist. Dementsprechend wird die Topographie der Niederschlagsverteilung aufgeprägt, was sich oftmals in einem Parallelenverlauf von Höhenschichtlinien und Isolinien gleichen Niederschlags zeigt (Abb. 5).

Eine deutliche Verbesserung der Interpolation durch Zusatzinformation ist offensichtlich.



**Abb. 5:** Jahresniederschlagssumme für den Bereich Osttirol. Obere Grafik Interpolation mit Ordinary Kriging; untere Grafik Interpolation mit External Drift Kriging (Blöschl, Merz; 2002).

### **Zusatzinformation – Seehöhe, Regression**

Die Verwendung der Seehöhe als Zusatzinformation, die mit Hilfe einer Regression mit den Niederschlagsdaten in Verbindung gebracht wird, wurde bei der Erstellung des Digitalen Klimaatlas Österreichs an der ZAMG (Auer et al., 2001) verwendet.

Als Datengrundlage dienen die mittleren Monatssummen aus der Normalperiode 1961-1990. Dabei werden sowohl Ombrometerwerte als auch Totalisatorwerte als

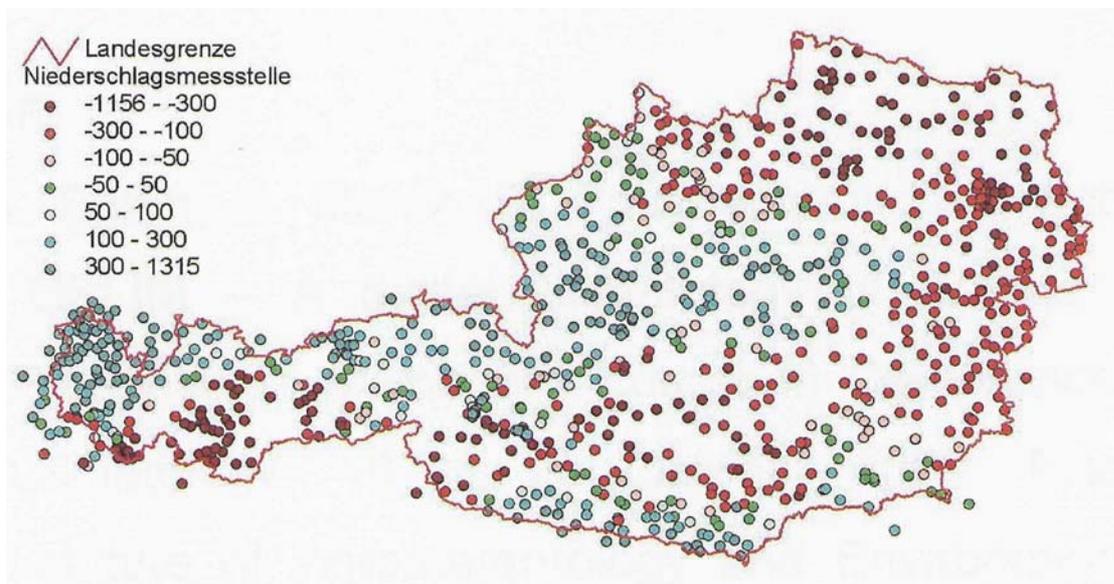
Daten herangezogen. Dies vor allem deswegen, um auch Informationen in den höher gelegenen Bereichen zu erhalten, da Ombrometermessstellen zum überwiegenden Teil nur in den unteren bis mittleren Höhen vorhanden sind. Zusätzlich wird zur Interpolation ein digitales Höhenmodell benötigt.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist folgende:

Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und der Seehöhe wird mit Hilfe einer Regression beschrieben und die so bestimmten Niederschlagswerte jedem Gitterpunkt zugeordnet. Danach werden für jede Messstelle die Residuen gebildet, das sind die Abweichungen der Niederschlagswerte aus der Regression von den Messwerten. Diese Residuen werden anschließend auf das Gitternetz interpoliert, und dort zu den vorhandenen Niederschlagswerten aus der Regression addiert um den Ergebnismesswert zu erhalten.

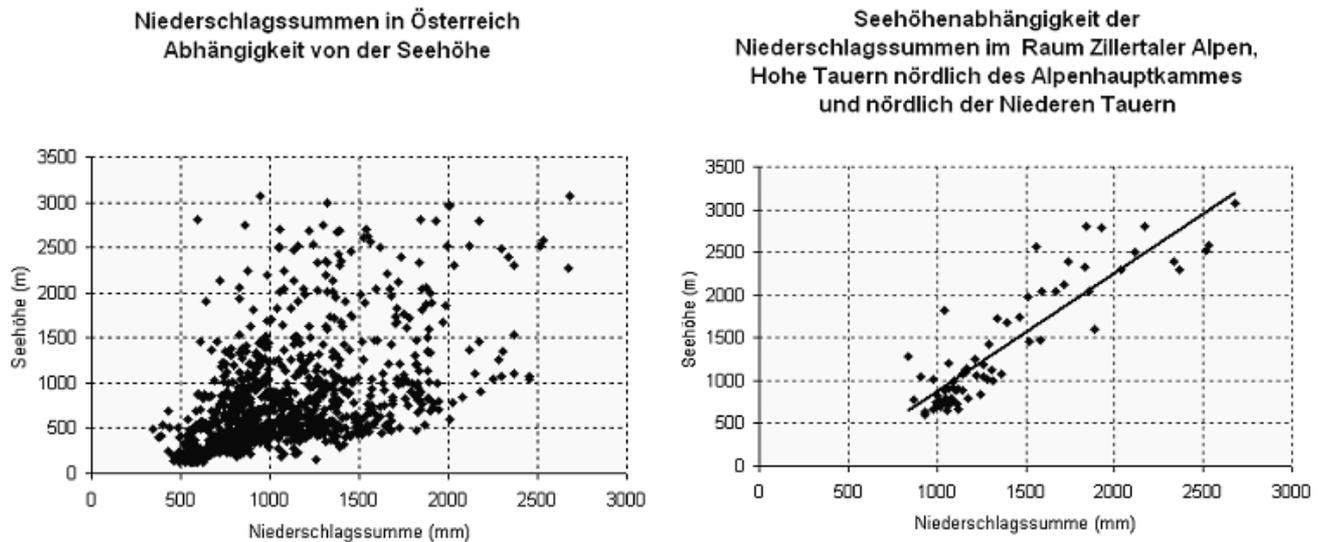
Diese prinzipielle Vorgehensweise wird insofern modifiziert, da die Höhenregression nicht nur für Gesamtösterreich durchgeführt wird, sondern getrennt für Teilbereiche in denen sich der Zusammenhang zwischen Seehöhe und Niederschlag verstärkt zeigt.

Als erster Schritt wird für Gesamtösterreich eine Regression der Niederschlagsdaten an den Messstellen mit der Höhe durchgeführt und für jede Messstelle die Differenz zwischen dem Messwert und dem berechneten Wert ermittelt. Aus einer räumlichen Analyse dieser Differenzen lassen sich Teilgebiete mit merklich unterschiedlichem Verhalten identifizieren, die auf unterschiedliche Seehöhenabhängigkeit des Niederschlags schließen lassen. Insgesamt konnten 9 Teilbereiche identifiziert werden (Abb. 6).



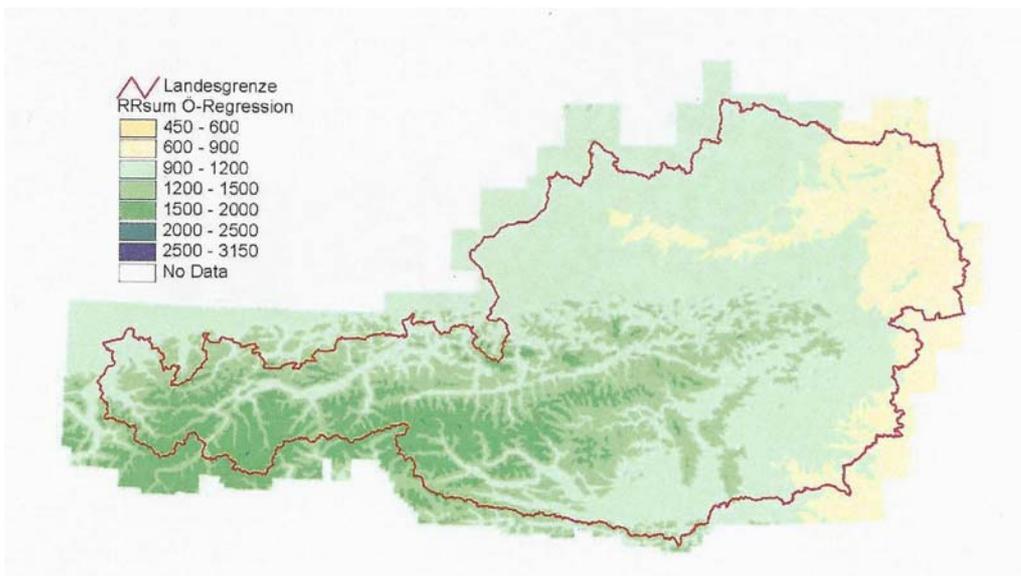
**Abb. 6:** Abweichung der Niederschlagssummen an den Messstellen von den Niederschlagswerten aus der Höhenregression berechnet (Auer et al., 2001).

In jedem dieser Teilbereiche wird wiederum eine Regressionsrechnung der Niederschlagssummen mit der Höhe durchgeführt (Abb. 7) und abermals die Differenzen an den Messstellen gebildet. Diese Differenzen werden nun mittels Ordinary Kriging räumlich interpoliert und mit den Niederschlagswerten des Regressionsmodells verknüpft, wodurch eine Anpassung der Modellwerte an die Messwerte (mittlere Monatssummen) erreicht wird.

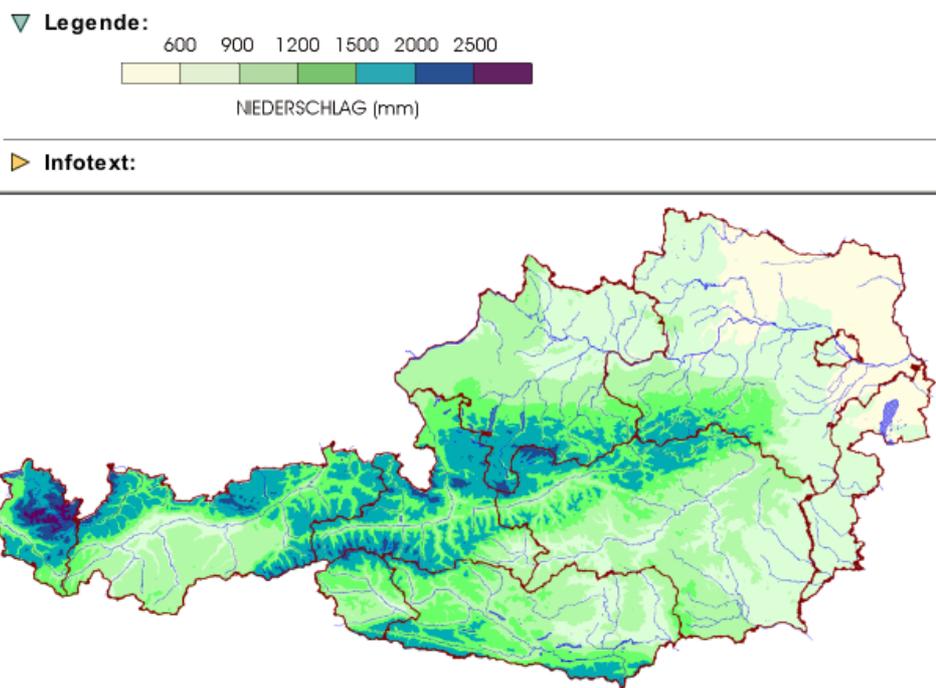


**Abb. 7:** Beispiel für die Abhängigkeit der jährlichen Niederschlagssumme von der Seehöhe; links für Gesamtösterreich und rechts für ein Teilgebiet (ÖKLIM, 2001).

Als Ergebnis folgt dann durch Aufsummierung der mittleren Monatswerte der mittlerer Jahresniederschlag 1961-1990 (siehe Abb. 9). Ein Vergleich des Endergebnisses mit den Niederschlagsdaten aus der Regression über Gesamtösterreich abgeleitet (Abb. 8), zeigt die Verbesserung der Niederschlagsverteilung die mit Teilregressionen erreicht wird.



**Abb. 8:** Mittlere Jahresniederschlagssumme durch Regression mit der Höhe erzeugt (Auer et al., 2001).



**Abb. 9:** Mittlerer Jahresniederschlag 1961-1990 (ÖKLIM, 2001)

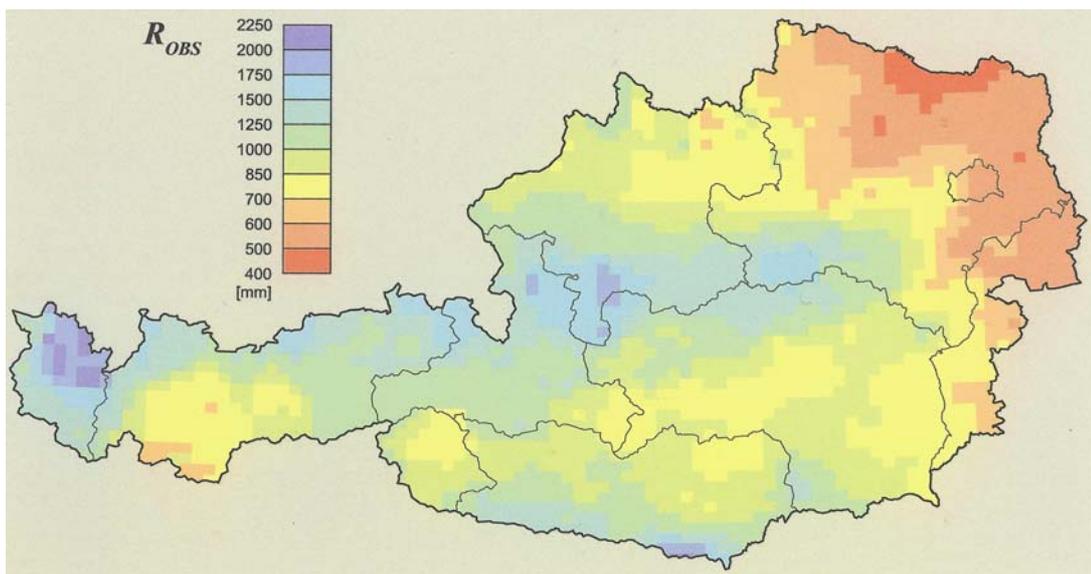
**Zusatzinformation – Seehöhe, konzeptionelles (physikalisches) Modell**

Für die Erstellung der Karte im Hydrologischen Atlas von Österreich „Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten“ (Skoda und Lorenz, 2003) wurden die Zusatzinformationen für die Interpolation aus einem konzeptionellen physikalischen Modell abgeleitet.

Als Ausgangsdaten werden Monatsniederschlagssummen von Messstellen unter 1500 m Seehöhe verwendet. Grundsätzlich könnten als Eingangsdaten alle Monatssummen

verwendet werden auch von Messstellen oberhalb 1500 m Seehöhe und auch Totalisatormessungen. Darauf wurde jedoch verzichtet, da den Daten hochgelegener Messstellen größere Unsicherheiten zugerechnet werden müssen. Insgesamt wurden 674 Messstellen verwendet, deren Niederschlagssummen lückenlos im Zeitraum 1961-1990 vorhanden waren.

Als erster Schritt werden die Messstellenwerte auf ein Gitternetz, das eine Maschenweite von 5 Winkelminuten in longitudinaler Richtung und 3 Winkelminuten in meridionale Richtung also ca. 6km \* 6km aufweist, interpoliert und zwar mit Gewichten, die indirekt proportional vom Quadrat der Entfernung abhängen (Abb. 10).



**Abb. 10:** Distanzgewichtetes interpoliertes Niederschlagsfeld ROBS für den Zeitraum 1961-1990 (HAÖ, 2003).

Dieses interpolierte Niederschlagsfeld wird nun in drei Schritten korrigiert:

1. regionale Seehöhenabhängigkeit des Niederschlags
2. lokale Besonderheiten am Gitterpunkt
3. statistischer Ausgleich mit der Seehöhe

### **Seehöhenabhängigkeit des Niederschlags**

Die Seehöhenabhängigkeit des Niederschlags wird in zwei Teile aufgespaltet, in einen Teil der den Stau bzw. Aufgleitniederschlag und in jenen der die konvektiven Niederschläge berücksichtigt.

### **Seehöhenabhängigkeit des Stau- und Aufgleitniederschlags**

Dazu wurde die Fähigkeiten eines mesoskaligen orographischen Niederschlagsmodells (ONM) genutzt, das im Rahmen des Programms IDNDR (International Decade of Natural Disaster Reduction) der österreichischen Akademie der Wissenschaften zwischen 1991 und 1997 entwickelt und an der ZAMG ab 1996 implementiert wurde.

Anhand vieler Modellläufe wurden typische klimatologische Stau- und Aufgleitniederschläge berechnet, wobei geachtet wurde, dass die Niederschläge im oberen Intensitätsdrittel simuliert wurden.

Diese Berechnungen wurden für jede Jahreszeit und 8 Windrichtungen (4 Haupt- und 4 Nebenwindrichtungen) durchgeführt. Als Ergebnis wurde für jede Jahreszeit der jeweils größte Tageswert (aus den 8 Fällen mit unterschiedlicher Windrichtung) ermittelt und dem Gitterpunkt zugeordnet.

Um jeden Gitterpunkt wird ein Quadrat von 50 km Seitenlänge gebildet, mit dem Gitterpunkt im Zentrum des Quadrates. Anhand der Gitterpunkte im Quadrat werden nun die Niederschlagswerte über eine Polynomregression mit der Geländehöhe in Verbindung gebracht. Dazu wird der Niederschlag normiert und ein Höhenabhängigkeitsfaktor  $F_1(z)$  des stratiformen Anteil des Niederschlag definiert

$$F_1(z) \equiv \frac{R_1(z)}{R_1(z = z_{\min})} \quad (11)$$

$z$  ist die Geländehöhe in km und  $z_{\min}$  die minimale Geländehöhe innerhalb eines Quadrates von 50 km Seitenlänge. Die Polynomregression lautet

$$F_1(z) = c_0 + c_1z + c_2z^2 + c_3z^3 \quad (12)$$

Dadurch wird der stratiforme Anteil der Höhenabhängigkeit des Niederschlags für jeden Gitterpunkt erhalten.

### Seehöhenabhängigkeit konvektiver Niederschläge

Die maximale Niederschlagsrate im Zentrum einer konvektiven Zelle wird durch vertikale Integration der feuchtadiabatischen Kondensationsrate abgeschätzt. Diese wiederum hängt von den vertikalen Profilen der Vertikalgeschwindigkeit, der mittleren Dichte und der Abnahme des Sättigungsmischungsverhältnisses bei feuchtadiabatischer Hebung ab. Da nur eine klimatologische Abschätzung für den konvektiven Anteil am Niederschlag benötigt wird, reicht es eine Parametrisierung aus einfach zu ermittelten Größen durchzuführen. Folgender Ansatz wurde nach mehreren Prüfungen, für den konvektiven Anteil  $F_2(z)$  am Höhenabhängigkeitsfaktor des Niederschlags angesetzt.

$$F_2(z) = d_{ok} + e^{\left(\frac{-z}{B}\right)} \quad (13)$$

$$d_{ok} = 1 - e^{(-z_{\min}/B)}$$

wobei  $B$  die vertikale Mächtigkeit der atmosphärischen Grundschicht angibt, deren Schwankung im Laufe des Jahres wird mit der Funktion

$$B = 2,5 \cdot \left[ 1 + 0,8 \sin \left( \frac{\pi \cdot TAG}{365} \right) \right] \quad (14)$$

Rechnung getragen.  $TAG$  bezeichnet den Kalendertag des Jahres.  $F_2(z)$  ist normiert, nimmt also für die Höhe  $z_{min}$  den Wert 1 an ( $z$  und  $z_{min}$  in km) und  $z_{min}$  ist wiederum die minimale Geländehöhe innerhalb des Quadrates um den Gitterpunkt.

### **Anteile von Stau- bzw. Aufgleitniederschlag und konvektivem Niederschlag am Gesamtniederschlag**

Aus einer Klassifizierung von neun räumlichen Verteilungstypen des Niederschlags, die anhand von Tagesniederschlagssummen vorgenommen wurde, können sowohl die jahreszeitliche Verteilung des Auftretens dieser räumlichen Verteilungstypen als auch die Zuordnung dieser Typen zu den Ostalpinen Wetterlagen (amtliche Klassifizierung der ZAMG) bestimmt werden. Für diese räumlichen Niederschlagsklassen sind die Andauer der Ostalpinen Wetterlagen bekannt. Jenen Wetterlagen mit überwiegend Strömungscharakter werden überwiegend Stau- und Aufgleitniederschläge und den windschwachen Wetterlagen, eher die konvektiven Niederschläge zugeordnet. Jede Wetterlage erhält dadurch eine Gewichtung bezüglich der beiden Niederschlagsanteile. Innerhalb Österreichs zeigen sich einhellige Jahresverläufe, daher können die Anteile aus allen vorkommenden Wetterlagen summiert werden.

Die gesamte Höhenabhängigkeit kann nun im Jahresverlauf folgendermaßen parametrisieren werden.

$$F(z) = \left[ 0,8 - 0,4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot TAG}{365}\right) \right] \cdot F_1(z) + \left[ 0,2 + 0,4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot TAG}{365}\right) \right] \cdot F_2(z) \quad (15)$$

### **Korrektur des Ausgangsfeldes**

Vorerst wird jeder Beobachtungsstation eine Ortshöhe  $h_{NEU}$  zugeordnet:

$$h_{NEU} = \frac{[z_{Station} + z_{ONM}]}{2} \quad (16)$$

wobei  $z_{ONM}$  die Seehöhe der jeweiligen Messstelle in Bezug auf das Topographie- bzw. auf das ONM-Gitter bezeichnet. Die räumliche Struktur des Feldes  $h_{NEU}$  ist glatter als diejenige aus dem Feld der wahren Stationshöhen und ist damit verträglicher mit den getroffenen Annahmen.

Die 1. Korrektur betrifft die regionale Seehöhenabhängigkeit des Niederschlags für jeden Gitterpunkt durch einen Zentralwert, der die Einflüsse aus der umgebenden Region enthält (Quadrat mit 50 km Seitenlänge).

$$R_{OBS,KORR1}(x_m, y_n) = R_{OBS}(x_m, y_n) \cdot \left[ \frac{F(z)}{F(z^*)} \right] \quad (17)$$

mit  $F(z)$  als Höhenabhängigkeitsfaktor  $F(z^*)$  als Wert von  $F(z)$  für die Höhe  $z = z^*$ . Dabei entspricht  $z^*$  einem Seehöhenmittel, das aus den dem Punkt  $(x_m, y_n)$  nächstgelegenen fünf Beobachtungsstationen mit den Seehöhen  $h_{NEU}$  mittels invers-quadratischer Distanzgewichtung berechnet wird.

Die 2. Korrektur beachtet lokale Besonderheiten der generellen Höhenabhängigkeit gegenüber den umliegenden Messstellen. Damit sollen solche Situationen berücksichtigt die als „trocken“ oder als „nass“ zu beschreiben sind.

$$R_{OBS,KORR2}(x_m, y_n) = R_{OBS,KORR1}(x_m, y_n) \cdot \left[ \frac{P(z^*)}{P(z)} \right] \quad (18)$$

wobei unter

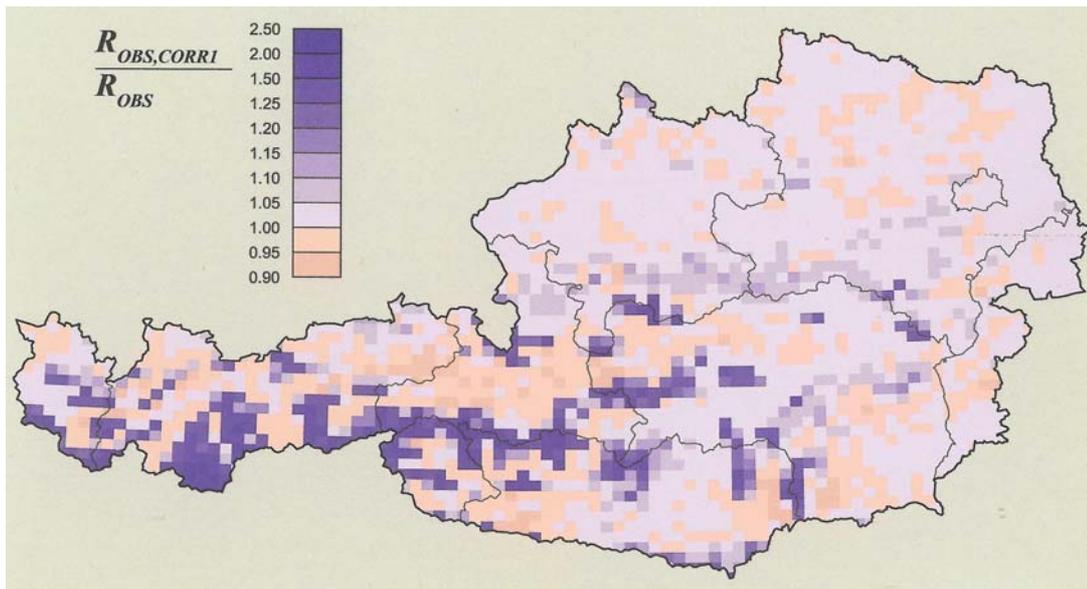
$$P(z^*) \equiv R(z_{min}) \cdot \left[ \frac{F(z^*)}{R_{OBS}(z^*)} \right] \quad (19)$$

zu verstehen ist.  $R(z_{min})$  bezeichnet den Niederschlag an der Stelle  $z_{min}$  im jeweiligen Quadrat (50 km mal 50 km),  $R_{OBS}(z^*)$  ist das mittels invers-quadratischer Distanzgewichtung errechnete Mittel des Niederschlags aus den um den betrachteten Gitterpunkt nächstliegenden fünf Stationen.  $P(z^*) > 1$  charakterisiert eine „trockene Umgebung“,  $P(z^*) < 1$  eine „feuchte Umgebung“. Von der lokale Anomalie  $P(z^*) \neq 1$  wird angenommen, dass diese von  $z^*$  bis auf das Gipfelniveau der Zentralalpen linear auf 0 abnimmt. Dieser lineare Ausgleich lautet:

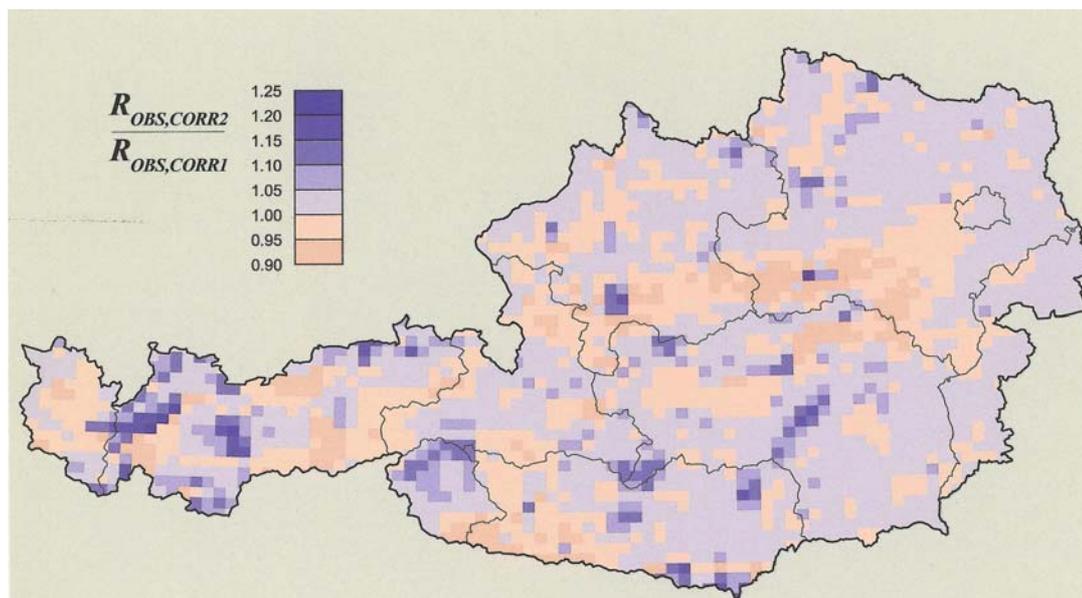
$$P(z) = 1 + \left[ \frac{1 - P(z^*)}{z_{max} - z^*} \right] \cdot (z - z_{max}) \quad (20)$$

$z_{max}$  ist die maximale Seehöhe auf dem ursprünglichen ONM-Gitter (innerhalb des jeweiligen Quadrates der Korrelationsrechnung).

Die 3. Korrektur betrifft einen statistischen Ausgleich mit der Seehöhe. Diese berücksichtigt den räumlichen Fehler des Niederschlags, der durch die Glättung der natürlichen Topographie auf das ONM-Netz bzw. durch die Einführung von hNEU eintritt. Die wahre Topographie erreicht über den Gipfeln der Zentralalpen um rund 500 m größere Höhen als die geglättete Version. In den sehr tiefen Lagen Ostösterreichs liegen die echten Höhen um rund 100 m niedriger als in der geglätteten Topographie. Folglich muss die Funktion  $F(z)$ , d.h. die Höhenabhängigkeit des Stau- bzw. Aufgleitniederschlags und des konvektiven Niederschlags, mittels eines für das gesamte Bundesgebiet einheitlich gewählten Ausgleichs zwischen den extremen Höhenstufen korrigiert werden. Das bedeutet, dass die Niederschlagshöhen in großen Höhen angehoben und für geringe Höhen (im Osten Österreichs) verringert werden



**Abb. 11:** Feld  $(R_{OBS,KORR1} / R_{OBS})$ ; Auswirkung der ersten Korrektur auf die mittlere Jahresniederschlagshöhe  $R_{OBS}$  für den Zeitraum 1961-1990 (HAÖ, 2003).



**Abb. 12:** Feld  $(R_{OBS,KORR2} / R_{OBS,KORR1})$ , Auswirkung der zweiten Korrektur auf die mittlere Jahresniederschlagshöhe des Zeitraums 1961-1990 (HAÖ, 2003).

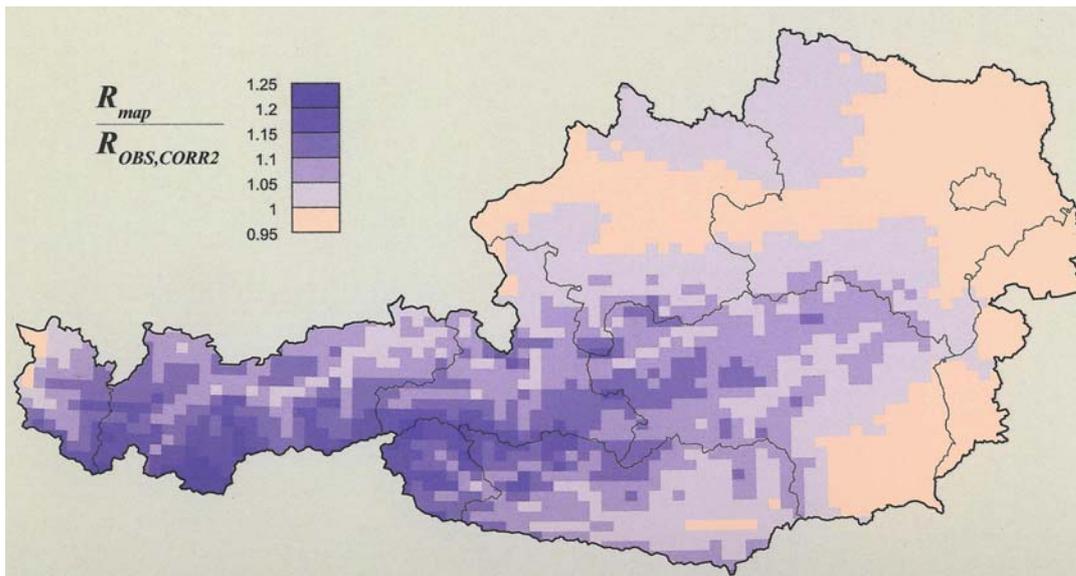


Abb. 13: Auswirkung der dritten Korrektur auf die mittlere Jahresniederschlagshöhe des Zeitraums 1961-1990 (HAÖ, 2003).

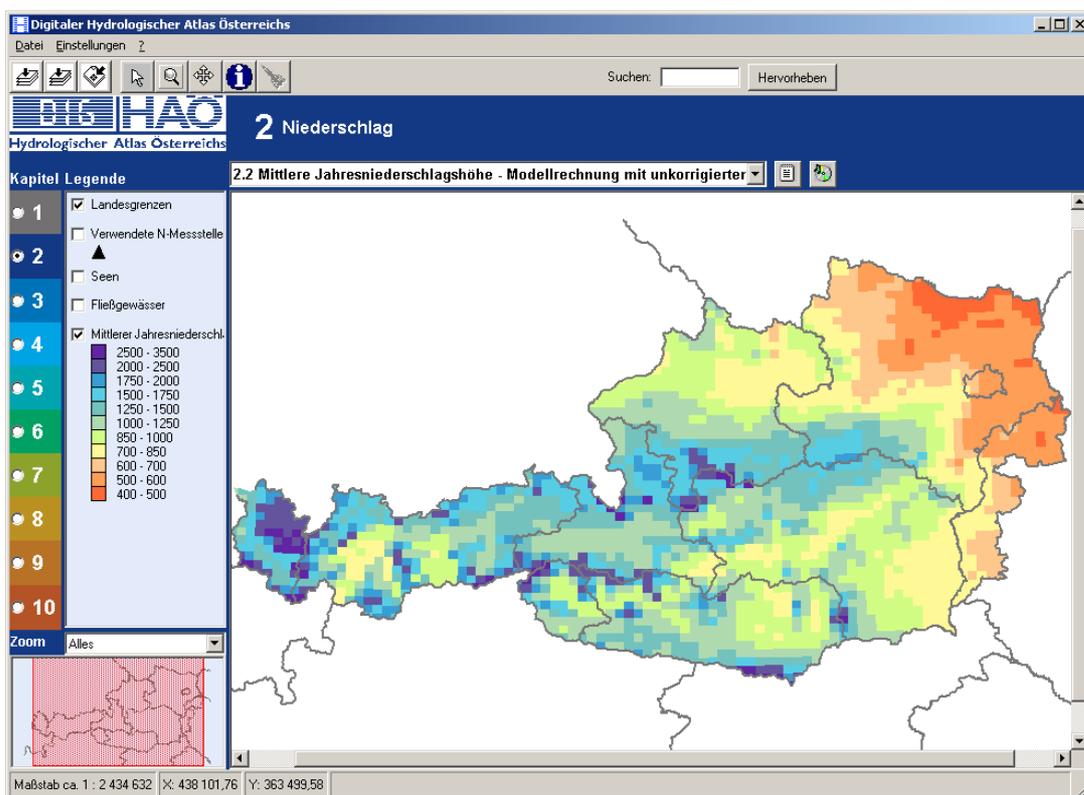


Abb. 14: Mittlere Jahresniederschlagssumme für die Periode 1961-1990 aus unkorrigierten Daten (HAÖ, 2003).

Letztendlich ergibt sich nach Zusammenstellung aller Korrekturen das interpolierte Feld des mittleren Jahresniederschlags aus der Periode 1961-1990 (Abb. 14).

Vergleiche zu anderen Auswertungen dieser Periode (z.B. ÖKLIM) zeigen doch Unterschiede, vor allem im Süden von Kärnten in den Karnischen Alpen die teilweise auf die Einschränkung der Niederschlagsdaten auf Messstellen unter 1500 m zurückzuführen sind. Die erforderliche Niederschlagszunahme, die durch die Messstellendaten angedeutet wird, kann durch das verwendete meteorologische Modell nicht adäquat beschrieben werden. Daher ist geplant, Verbesserungen an den Modellansätzen durchzuführen, die die Erfahrungen, die bei der Erstellung der Karte für die „Klimatische Wasserbilanz“ (im Kartenblatt 7.1) des HAÖ gesammelt wurden, berücksichtigen.

Abschließend ist zu bemerken, dass durch diese Unterschiede der einzelnen Methode verdeutlicht wird, dass grundsätzlich keine Methode als „die“ Methode anzusehen ist mit der Regionalisierung durchzuführen ist, und andererseits trotz vielfältigen Zusatzinformationen auf ein dichtes Messstellennetz das mit guten Messgeräten ausgestattet ist und deren Messdaten auf Plausibilität geprüft und korrigiert werden, nicht verzichtet werden kann.

### 3. Literatur

Auer I., R. Böhm, H. Mohnl, R. Potzmann, W. Schöner und P. Skomorowski (2001) ÖKLIM – der Digitale Klimaatlas Österreichs; Deutsch- Österreichisch-Schweizer-Meteorologentag, DACH 2001, Wien.

Auer I., R. Böhm, H. Mohnl, R. Potzmann, W. Schöner und P. Skomorowski (2001) ÖKLIM – Digitaler Klimaatlas Österreichs (CD-ROM), Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Bica B. und R. Steinacker (2005) High Resolution Analysis over Complex Terrain by using Physical a Priori Knowledge. Proc., 28th Int. Conf. On Alpine Meteorology (ICAM), Zadar 2005, Hrv. Meteor, casopis 40, 145-148.

Blöschl G. und R. Merz (2002) Methoden der hydrologischen Regionalisierung in Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung, Wiener Mitteilungen Bd. 164, S. 149-177, Wien.

Haiden T., A. Kann, G. Pistonik, K. Stadlbacher, M. Steinheimer, F. Wimmer und C. Wittmann (2006) Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA): System Overview, Bericht der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Hydrologischer Atlas Österreichs (HAÖ) (2003)– Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Lorenz P. und G. Skoda (1999) Ermittlung von Flächenmitteln des Niederschlags aus punktuellen Messungen; *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 78, S.47-65, Wien.

Merz R., G. Blöschl und J. Parajka (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 50, H.1, Wien.

Skoda G. und P. Lorenz (2003) Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnung mit unkorrigierten Daten, Karte 2.2, Hydrologischer Atlas Österreichs (HAÖ), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Steinacker R., M. Ratheiser, B. Bica, B. Chimani, M. Dorninger, W. Gepp, C. Lotteraner, S. Schneider and S. Tschannett (2006) A Mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain; *Monthly Weather Review*, (in Druck).

**Anschrift der Verfassers:**

Dr. Viktor Weilguni  
Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
Abteilung VII/3 (Wasserhaushalt – HZB)  
Marxergasse 2  
1030 Wien  
E-Mail: Viktor.WEILGUNI@lebensministerium.at  
Internet: www.lebensministerium.at

## 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

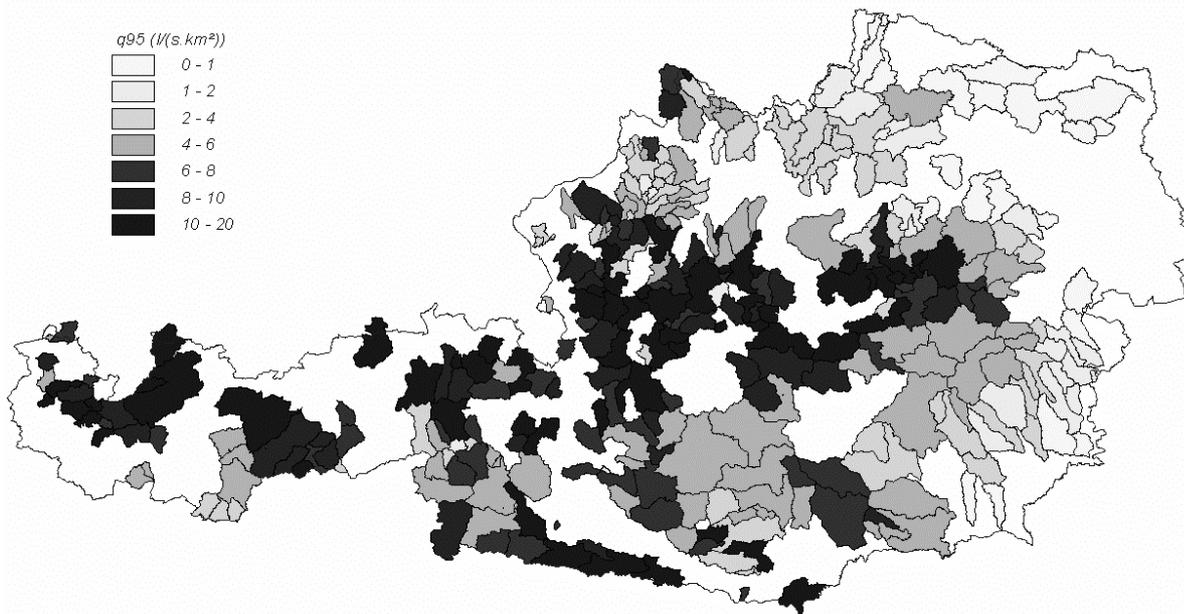
Datensatz besteht aus 481 Pegelzwischen-einzugsgebieten für die mindestens 5 Jahre durchgehende Abflussreihen innerhalb der Bezugsperiode vorliegen. Mit diesem Datensatz werden ca. 60% der Fläche Österreichs abgedeckt.

### 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 ( $A$  [ $10^1 \text{ km}^2$ ]), die topographische Höhe ( $H$ ), die topographische Neigung ( $S$ ), den Niederschlag ( $P$ ), die Geologie ( $G$ ), die Landnutzung ( $L$ ), und die Gewässernetzdichte ( $D$  [ $10^2 \text{ m/km}^2$ ]). Die topographische Höhe des (Zwischen-)einzugsgebiets wird durch die Seehöhe des Pegels ( $H_0$  [ $10^2 \text{ m}$ ]), die maximale Seehöhe ( $H_+$  [ $10^2 \text{ m}$ ]), die Höhendifferenz ( $H_R$  [ $10^2 \text{ m}$ ]) und die mittlere Seehöhe ( $H_M$  [ $10^2 \text{ m}$ ]) beschrieben.



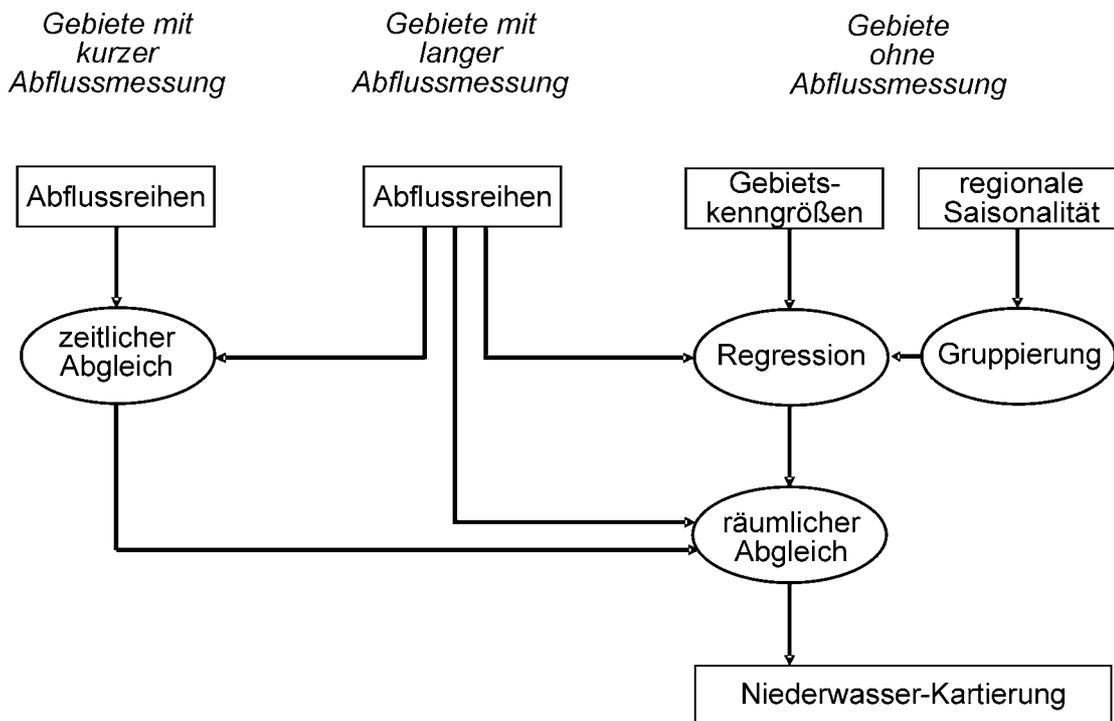
**Abb. 1:** Niederwasserspende  $q_{95}$  (l/s.km<sup>2</sup>) aus Abflussdaten von 325 Zwischeneinzugsgebieten in Österreich. Alpine Einzugsgebiete zeigen höhere Werte und eine größere Variabilität.

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<sup>2</sup> mm]), den mittleren Sommerniederschlag ( $P_S$  [10<sup>2</sup> mm]), und den mittleren Winterniederschlag ( $P_W$  [10<sup>2</sup> 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 Einzugsgebietenkennwerten zu schätzen. Zusätzlich ist ein Verfahren zur Gruppierung von Gebieten mit ähnlichem hydrologischen Verhalten bei Niederwasser erforderlich. Die Schätzungen für die drei Einzugsgebietenfälle 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.

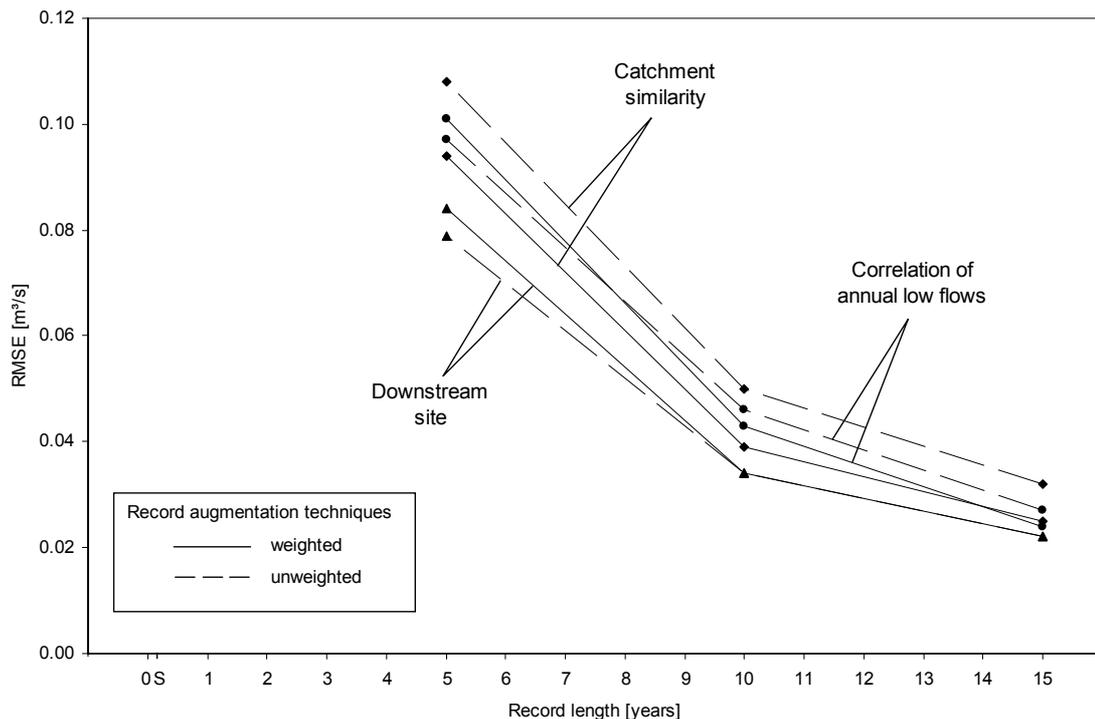
## 4.2 Zeitlicher Abgleich

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.



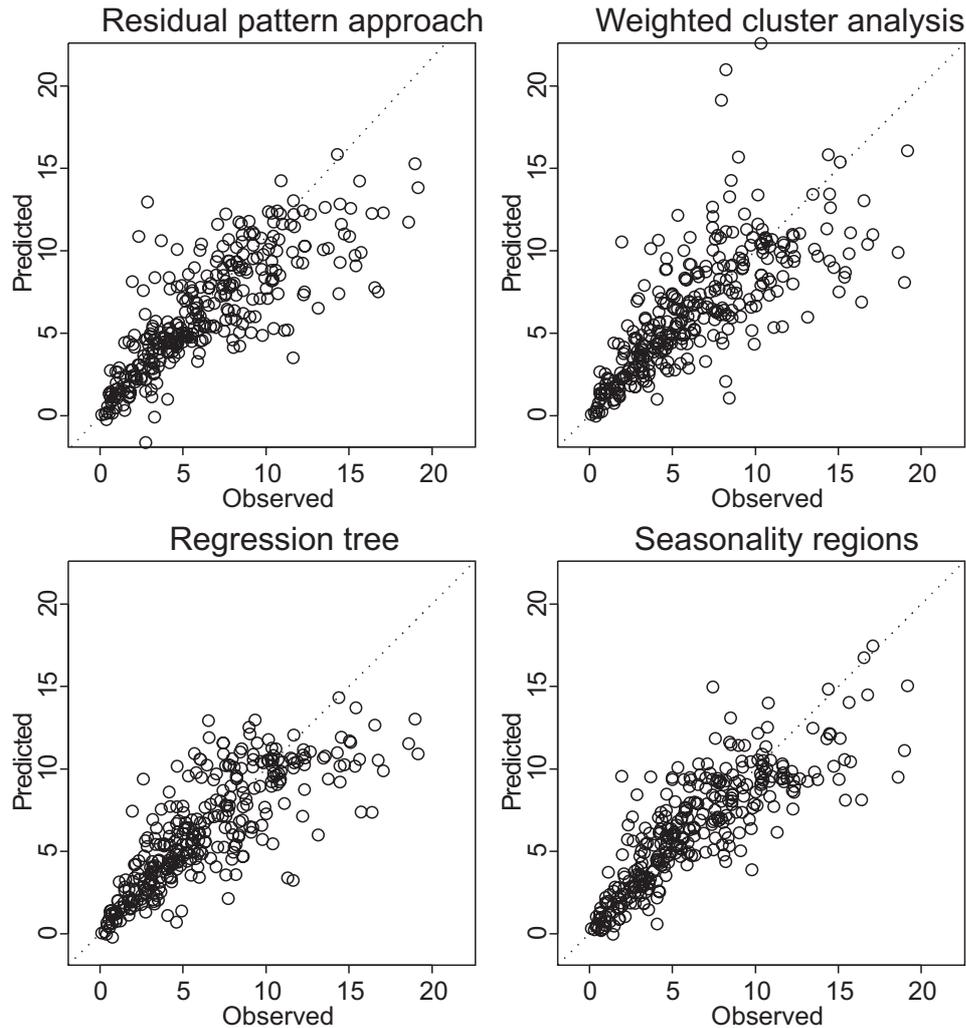
**Abb. 3:** Absoluter Fehler RMSE ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) des Niederwasserabflusses  $Q_{95}$  kurzer Reihen (<20 Jahre) im Vergleich zum Niederwasserabfluss der 20-jährigen Reihe. Drei Verfahren zur Wahl des Referenzpegels werden kombiniert mit zwei Ansätzen zur Kennwertkorrektur (gewichtet, nicht 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 Residuenmustermethode (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 <sup>2</sup>	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.

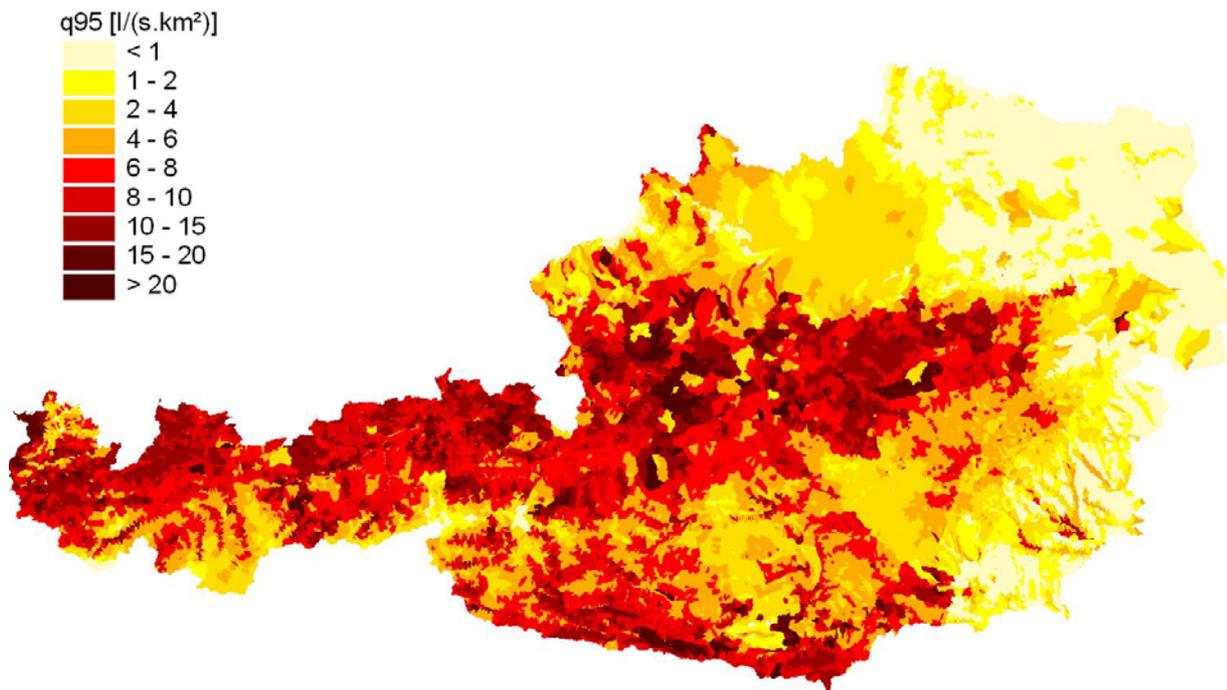
## **6. Zusammenfassung des österreichischen Verfahrens**

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](mailto: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](mailto:bloeschl@hydro.tuwien.ac.at), <http://www.hydro.tuwien.ac.at>



## **REGIONALISIERUNG VON STATISTISCHEN HOCHWASSERKENNGRÖSSEN**

Ralf Merz

### **1. Einleitung**

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

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

Statistische Hochwasserkenngößen, für deren Regionalisierung in diesem Beitrag Methoden beschrieben werden, können Momente der Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilung, wie z.B. Mittelwert, Varianz bzw. Variationskoeffizient (CV) und Schiefe (CS), sowie Quantile des Abflussscheitels einer bestimmten Jährlichkeit, wie z.B. HQ<sub>30</sub> oder HQ<sub>100</sub> sein.

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

### **2. Ermittlung von Hochwasserkenngößen in beobachteten Gebieten**

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

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

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

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

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

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

Kausale Information zur Verbesserung der Hochwasserabschätzung erhält man durch Analyse der Prozesse der Hochwasserentstehung. Ein Beispiel hierfür ist die Analyse von Abflussbeiwerten von beobachteten Hochwässern. Hierzu können Abflussbeiwerte von ausgewählten Hochwasserereignissen der Beobachtungsreihe ermittelt werden bzw. auf die Datenbasis von Merz et al. (2006) zurückgegriffen werden. In Merz et al. (2006) wurden Abflussbeiwerte von ca. 50000 Ereignissen in 326 österreichischen Einzugsgebieten mit einer Flächen von 80 bis 10000 km<sup>2</sup> für den Zeitraum 1981-2001 ausgewertet. Unter den ausgewerteten Abflussereignissen waren 3032 Hochwasserereignisse mit dem größten jährlichen Scheitelwert. In den niederschlagsreichen und damit meist sehr feuchten Gebieten sind die Abflussbeiwerte der jährlichen Hochwässer in der Regel sehr hoch. Diese deuten auf eine stetig hohe Abflussbereitschaft der Gebiete hin. Große Hochwässer unterscheiden sich somit von kleineren Hochwässern nur durch die Größe des Niederschlages. Es ist somit eine eher kleinere Schiefe der Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilung zu erwarten. In trockeneren Gebieten sind die Abflussbeiwerte meistens klein. Große Abflussbeiwerte sind selten, können aber auftreten. Große Hochwässer können sich somit von kleineren Hochwässern nicht nur durch die Größe des Niederschlages unterscheiden, sondern auch durch einen wesentlich größeren Abflussbeiwert. Für solche Gebiet ist mit einer wesentlich größeren Schiefe der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen.

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

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

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

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

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

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

### 3. Regionalsierungsmethoden

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

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

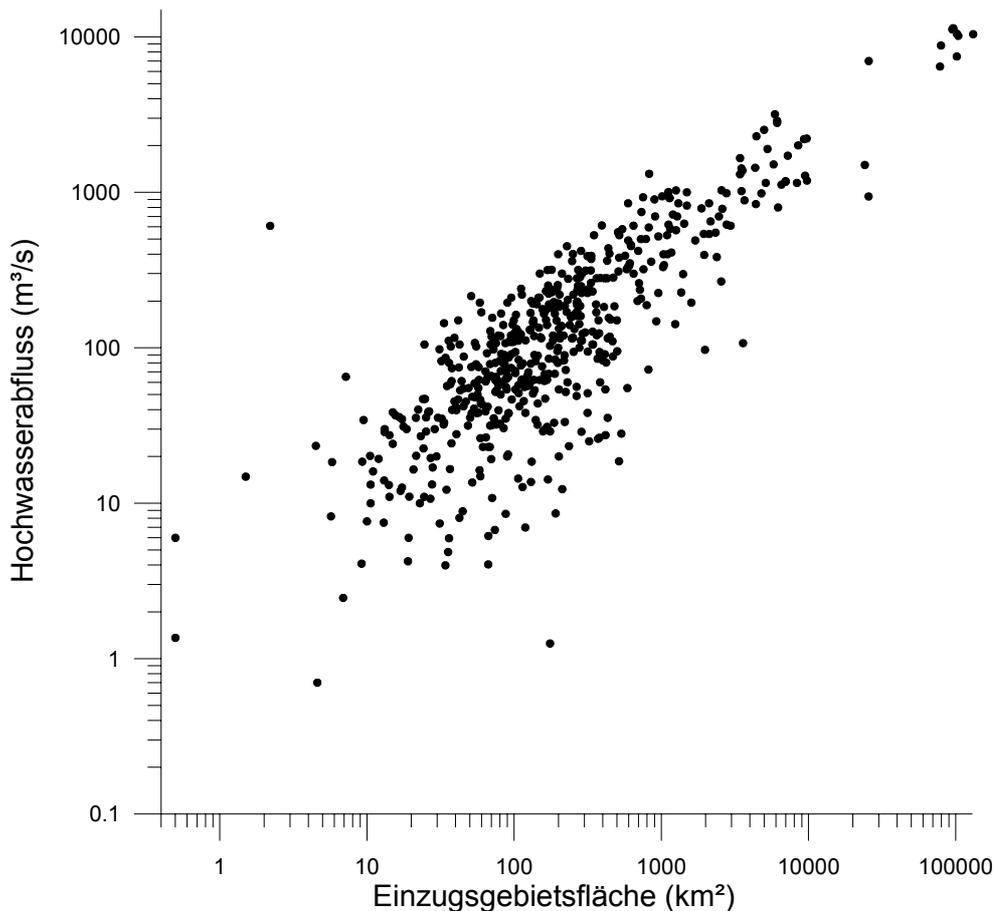
#### 3.1 Hüllkurven und empirische Formeln

Ein sehr einfaches und früher weit verbreitetes Verfahren zur Regionalisierung von Hochwasserkennwerten sind Hüllkurven der Hochwasserabflüsse. Hierbei werden die größten beobachteten Hochwasserabflüsse in einer Region gegen die Gebietsgröße aufgetragen (Wundt, 1949). Die Hüllkurve ist jene Kurve, die gerade über allen beobachteten Ereignissen liegt. Die Hüllkurve ist somit ein erstes Maß für den maximalen Hochwasserabfluss, der in dieser Region zu erwarten ist. Die Aussagekraft dieses Maßes hängt davon ab, wie viele maximale Hochwasserabflüsse mit verschiedenen Ursachen der Hochwasserentstehung beobachtet wurden. Den Werten der Hüllkurve ist jedoch keine Wahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit zugeordnet, was den Gebrauch von Hüllkurven für Bemessungszwecke stark einschränkt. In Abb. 1 sind die maximal beobachteten Abflüsse von 570 österreichischen Pegeln für den Beobachtungszeitraum 1871 bis 2005 aufgetragen. Es zeigt sich eine sehr weite Streuung. So ist für ein Gebiet von ca. 100 km<sup>2</sup> der niedrigste Wert etwa 4 m<sup>3</sup>/s, der größte beobachtete Wert für diese Gebietsgröße ist über 200 m<sup>3</sup>/s.

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

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

wobei  $A_E$  die Einzugsgebietsfläche (km<sup>2</sup>) ist. Diese Ansätze sind sehr einfach anzuwenden.



**Abb. 1:** Maximal beobachteter Abfluss (m<sup>3</sup>/s) für 570 österreichische Pegel der Jahre 1871 bis 2005.

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

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

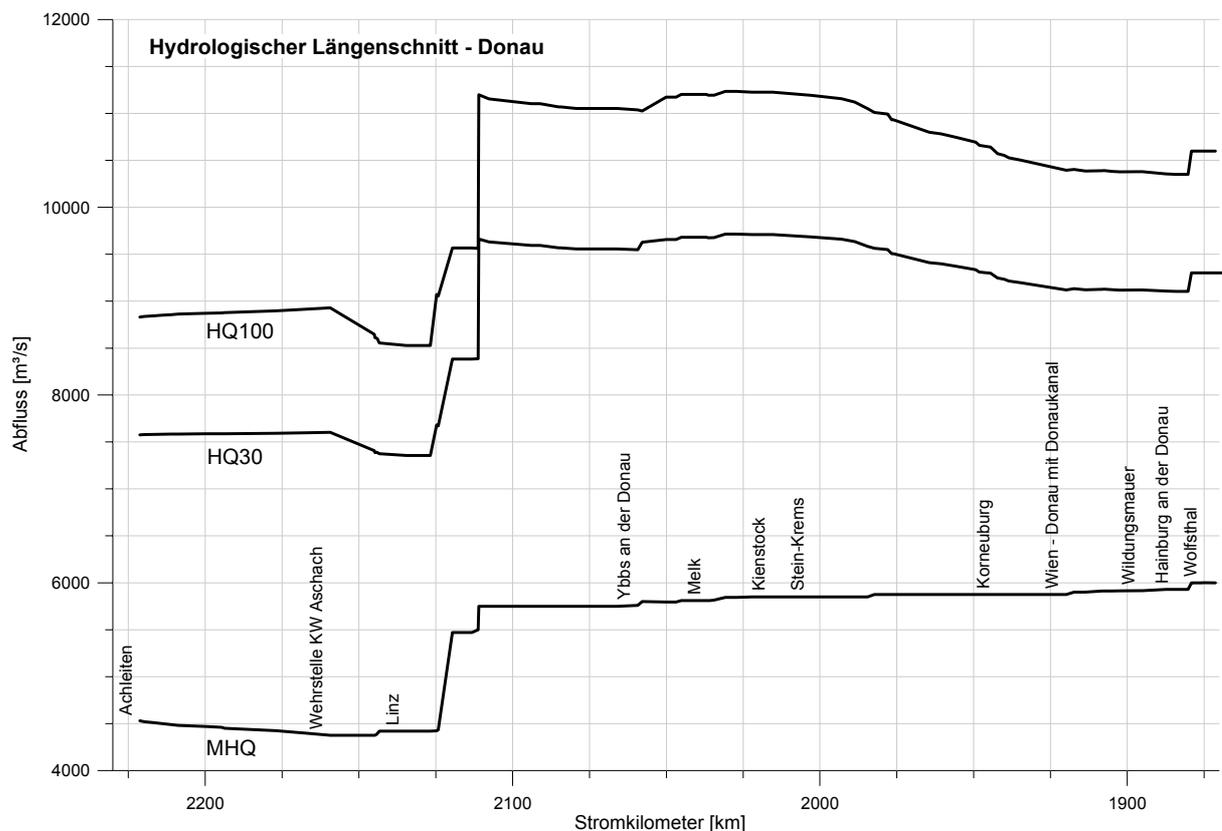
erlauben durch gebietsabhängige Koeffizienten, hier Koeffizient  $\alpha$ , eine Anpassung an lokale Verhältnisse. Viele neuere Formeln enthalten auch Angaben zum Ereignisniederschlag (Hagen, 2005). Eine Verwendung dieser Formeln ohne Kenntnis der Abläufe im Gebiet ist als sehr kritisch anzusehen (Hagen,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

### 3.2 Hydrologische Längenschnitte

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

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

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

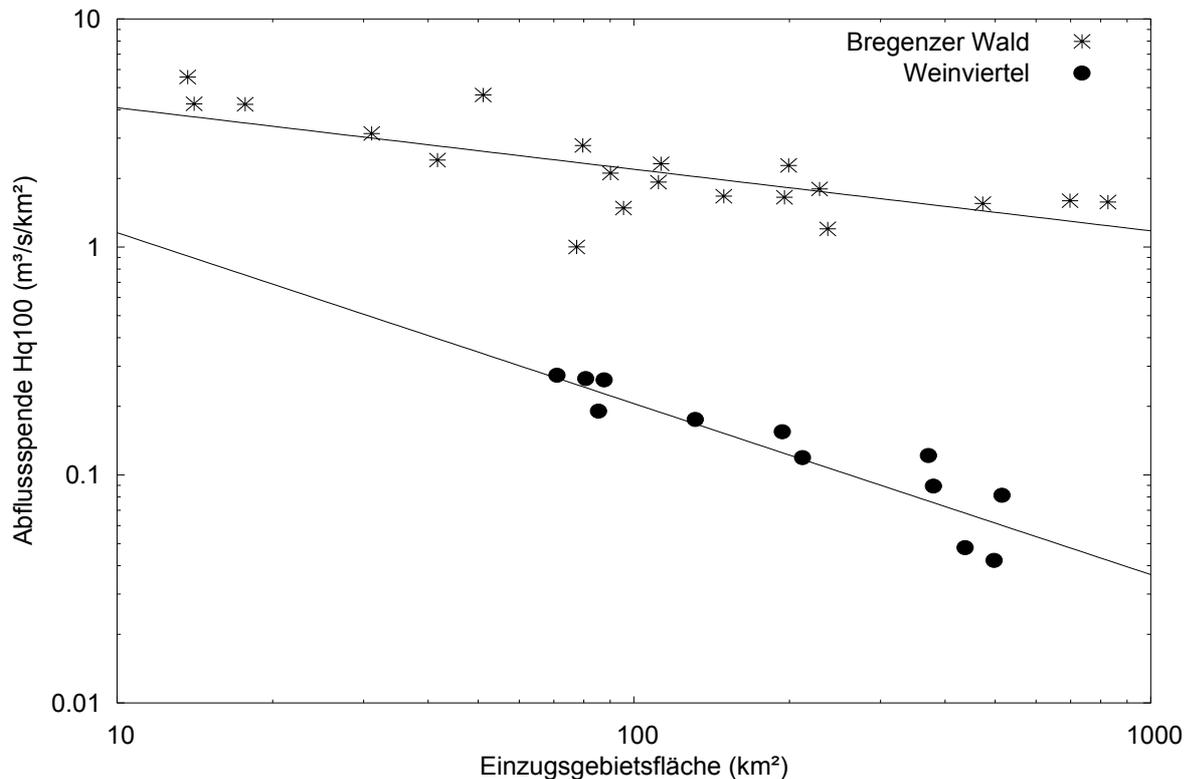


**Abb. 2:** Hydrologischer Längenschnitt der österreichischen Donau für das mittlere jährliche Hochwasser,  $Hq_{30}$  und  $Hq_{100}$ .

### 3.3 Regionale Ansätze/Gruppierungsmethoden

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

Einfache Regionalisierungsverfahren, die auf dieser Idee aufbauen sind regionale Spendendiagramme. Hierzu werden Pegelgebiete zu Regionen bzw. Gruppen zusammengefasst. Für jede Region werden die Hochwasserkennwerte als Spenden (z.B. MHq, Hq<sub>100</sub>) gegen die Gebietsfläche graphisch aufgetragen (Abb. 3). Ist das Hochwasserverhalten der Gebiete in dieser Region ähnlich, so nimmt die Hochwasserspende mit der Gebietsfläche in ähnlicher Weise ab.



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

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

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

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

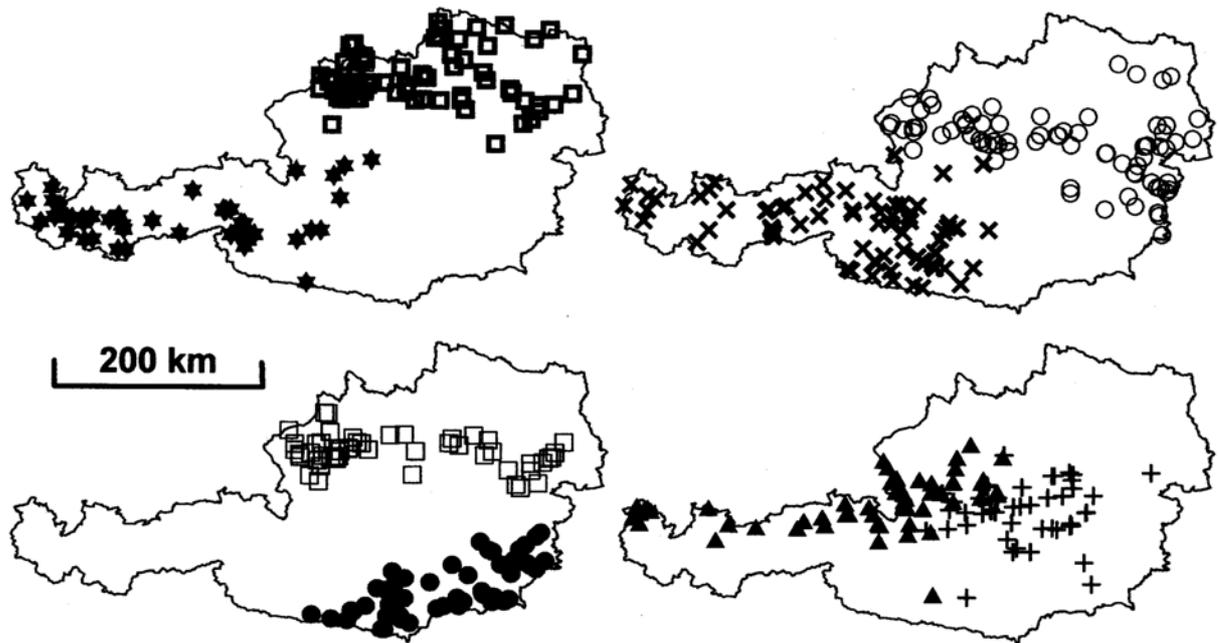
Die bekannteste Methode, welche auf die Bestimmung homogener Regionen (im Englischen oft „Pooling Group“ genannt) beruht, ist die „Index flood method“ (Dalrymple, 1960; Flood Studies Report, 1975). Die Index flood Methode besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt werden homogene Regionen gefunden.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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

### 3.4 Funktionale Zusammenhänge mit Gebietseigenschaften

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.5 Geostatistische Interpolation von Hochwasserkenngrößen

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

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

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

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

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

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

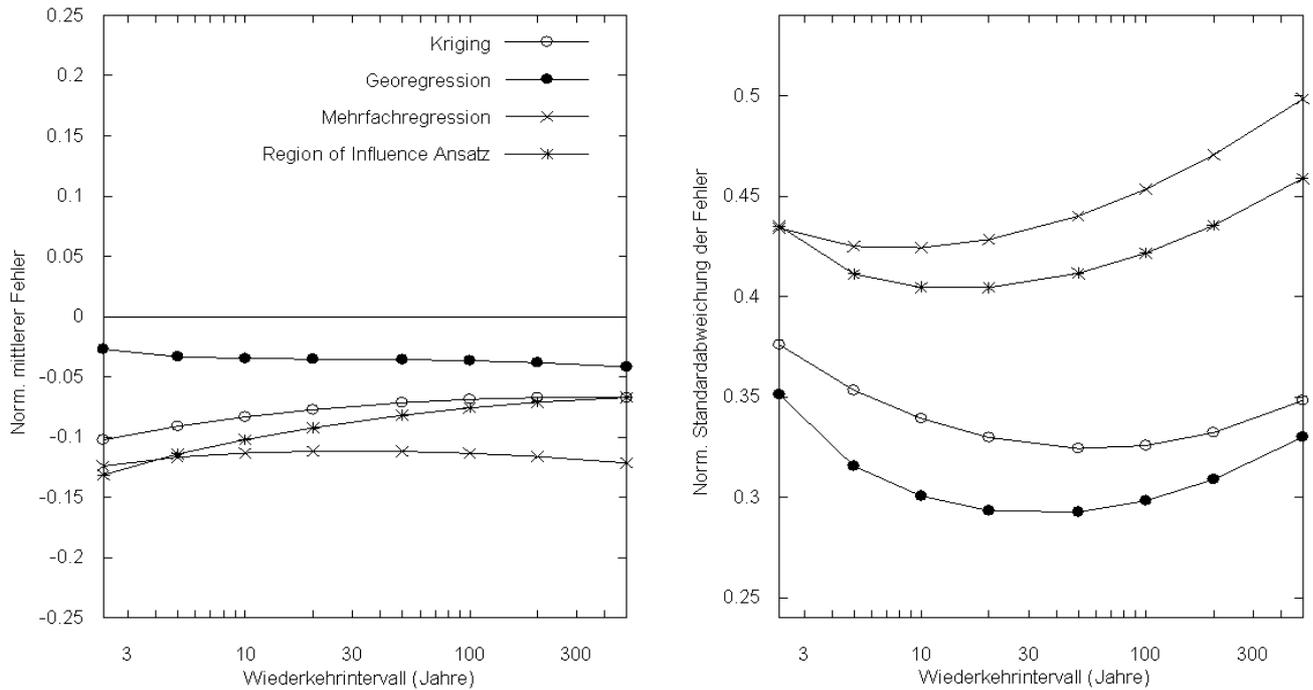
wobei  $q_N$  die auf die hypothetische Gebietsfläche  $A_N$  normierte Abflussspende und  $q_A$  die Abflussspende der Gebietsfläche  $A$  ist. Typische Werte für den Exponenten  $\alpha$  sind 0.25 bis 0.45. Der Exponent spiegelt die dominierenden hydrologischen Prozesse in der Region wider. Sind großräumige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

#### 4. Vergleich und Diskussion von Regionalisierungsmethoden

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

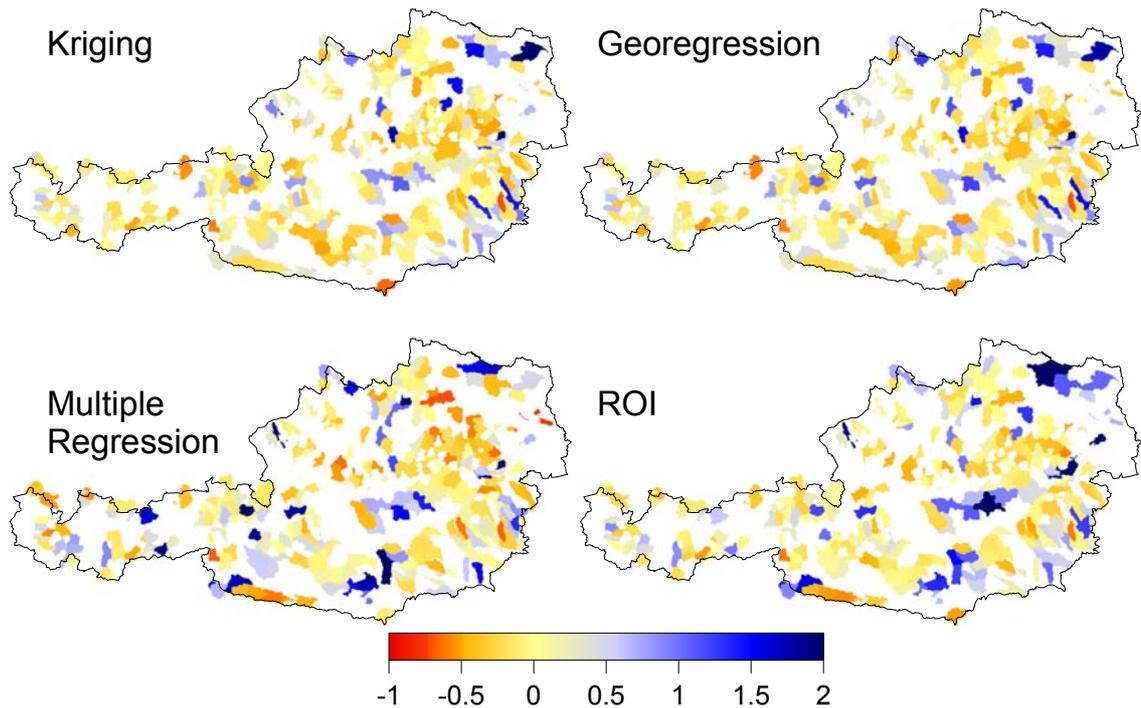
Zusatzinformation, Mehrfachregressionen und der ROI Ansatz als Repräsentant der Pooling Methoden verglichen. Ein besonderes Augenmerk wurde auf den Vergleich von Methoden gelegt, die einerseits räumliche Distanz als Maß der Ähnlichkeit zwischen Gebieten verwenden, wie Kriging und Kriging mit Zusatzinformation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

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

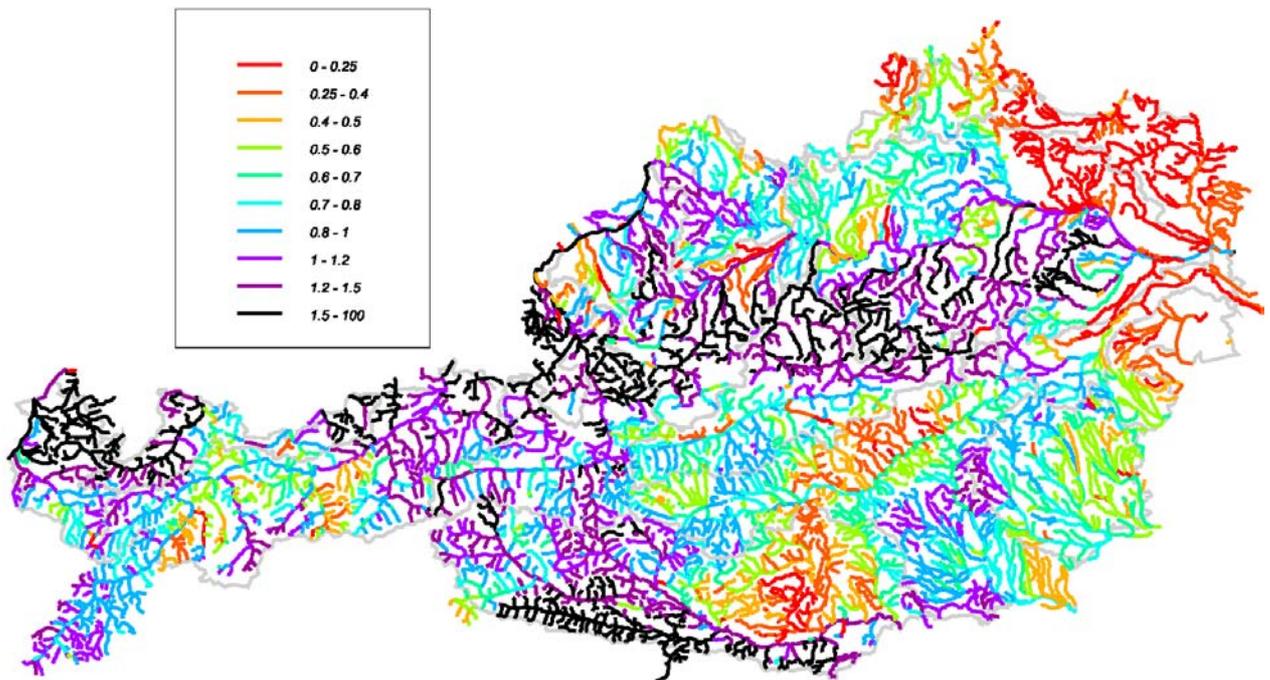


Abb. 7: 100-jährliche Abflussspende (m³/s/km²), normiert auf 100km²

## 5. Danksagung

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

## 6. Literatur

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Anschrift des Verfassers:**

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

## **HYDROLOGISCHE REGIONALISIERUNG - ERFAHRUNGEN EINES INGENIEURBÜROS**

Günter Humer, Alexander Hochhold, Wolfgang Wührer und Michael Hofer

### **1. EINLEITUNG**

Hochwässer gelten als die am häufigsten auftretenden Elementarschadensereignisse in unseren Breiten. Jedoch ist es bislang nicht wirklich gelungen, eine flächendeckende Analyse auf ein eintretendes Schadenspotential zu erstellen.

Nach dem Jahrhundert-Hochwasser des Jahres 2002, das verheerende Schäden hinterließ, wurde deutlich, dass derart große Schadenspotentiale künftig neu erfasst und bewertet werden müssen.

Für die planerische Aufarbeitung von Hochwasserschutzmaßnahmen sind die hydrologischen Daten eine wichtige Grundlage. Ein Ingenieurbüro ist oft mit der Fragestellung konfrontiert, für unbeobachtete Gebiete hydrologische Daten wie Niederschläge und Abflüsse festlegen zu müssen. Für Niederschlags- Abfluss-Modelle (NA- Modelle) sind oft auch abflusswirksame Gebietesparameter zu regionalisieren.

Das Projekt HORA (HOchwasserRisikozonierung Austria) ist ein Ansatz, flächendeckend für ganz Österreich regionalisierte Abflusswerte bereitzustellen und verdeutlicht mehr denn je die Akzeptanz eines renovierten Risikobewusstseins sowohl bei Wahrnehmung des ständig steigenden volkswirtschaftlichen Schadenspotenzials durch meteorologische Extremereignisse als auch eine daraus entstehende unübersehbare Notwendigkeit von effektiven und vorbeugenden Hochwasserschutzmassnahmen. Das Projekt an sich stellt einen wichtigen Knotenpunkt in der Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Hand und der Privatwirtschaft dar. Europaweit einzigartig jedoch speziell für Österreich hochbedeutend konnte eine überblicksmäßige Vereinheitlichung der hydrologischen Betrachtungsweise für das gesamte Bundesgebiet erreicht werden, welche erstmals eine Form der Regionalisierung abflussbezogener Daten auf unbeobachtete Gebiete ermöglicht.

### **2. BEISPIEL PROJEKT HORA**

Steigender Siedlungsdruck und ein erhöhter Sicherheitsanspruch der Bevölkerung fordern in Österreich eine ständige Weiterentwicklung und den Einsatz neuester Technologien und Instrumente für präventiven Schutz der Menschen und des Lebens- und Kulturraumes. Ein ausgeklügeltes Risikomanagementsystem mit dem Schwerpunkt auf Hochwasserextremereignissen und deren Überflutungsbereichen steht im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses.

Als Ziel des Projektes HORA steht eine Ausweisung von Überschwemmungsflächen für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten  $T=30$ ,  $T=100$  und  $T=200$  bezogen auf das

im Maßstab 1:500 000 erfasste österreichische Flussnetz (ÖK 500) mit einer Gesamtlänge von ca. 26 000 km. Eine grobe Einteilung des Projektes kann einerseits in einen hydraulischen und andererseits in einen hydrologischen Teil erfolgen. Die Arbeitsgemeinschaft TUW (Technische Universität Wien) und IGH (Ingenieurbüro DI Günter Humer, Geboltskirchen) bearbeitete die hydrologischen Verhältnisse während das Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG, Ottobrunn, Bayern) die hydraulischen Rechenschritte des Projektes durchführte. Durch die Zusammenarbeit von universitären Instituten mit einem Ingenieurbüro konnten praktische Erfahrungen einerseits und wissenschaftliches Know How andererseits direkt in Verbindung gebracht werden und so optimale Ergebnisse für das Projekt erzielt werden.

HORA stellt für sich ein ganz neuartiges Modell dar, das, wie noch kein Projekt zuvor, mit enormen Input an Informationen, Pegeldaten und einem neuartigen Regionalisierungsprogramm eine Vielzahl von Komponenten auf einen Nenner bringt und es uns ermöglicht, eine flächendeckende Betrachtung vorzunehmen. Eine Neuorientierung in der Risikokommunikation konnte hiermit sowohl für die Bevölkerung, als auch für die Versicherungswirtschaft geschaffen werden. Die gewonnenen Informationen dienen als Ersteinschätzung des Risikos und können als Vorinformation für jedermann dienlich sein. Als Ergebnis der vorliegenden Arbeiten stehen Abflüsse als Schätzwerte mit einer sehr guten Annäherung an die geforderte Jährlichkeit. Da diese nur Erwartungswerte darstellen, können sie sehr wohl von den tatsächlichen in der Planung verwendeten Bemessungswerten abweichen.

## **2.1 PROJEKTSABLAUF**

Im Jahre 2004 wurde das Projekt HORA ins Leben gerufen und bereits im Herbst desselbigen Jahres begann man mit der Aufbereitung der nötigen Daten. Ein flussregionsspezifischer Zeitplan wurde bestimmt und nach diesem im 2 Wochen-Takt vorgegangen. Nach Einarbeitung und Datenauslese, mit den jeweiligen Landesdienststellen vor Ort abgehandelt, konnten eine flächendeckende Regionalisierung des zur Verfügung gestellten Gewässernetzes vorgenommen werden. Nach über einjähriger intensiver Arbeit konnten im Jänner 2006 die letzten Flussgebiete nach hydrologische Ausarbeitung abgegeben werden.

## **2.2 EINARBEITUNG**

Wichtige Arbeitsschritte wurden diskutiert und eine genaue Vorgehensweise bei der Verfahrensabwicklung abgesprochen zwischen der Arbeitsgemeinschaft und seitens des Auftraggebers. Speziell die Größe des Projektgebietes und die enorme Mengen an zu verarbeitenden Daten waren eine große Herausforderung für die Mitarbeiter und die Rechenleistung der EDV Anlage musste den Anforderungen angepasst werden. Das Bearbeitungsgebiet wurde zwecks Überschaubarkeit auf drei Sachbearbeiter aufgeteilt, die sich ständig über die Arbeitsschritte austauschten. 2,5 Mannjahre von Seiten des IGH sind nötig gewesen, um das Projektes zu bearbeiten.

### 2.3 PEGELABSTIMMUNG

Als primäre Datenbasis für das Projekt wurden die Pegelmessstellen der hydrographischen Dienste verwendet. Jede einzelne Messstelle wurde auf Plausibilität und Verwendbarkeit geprüft. Insgesamt wurden Hochwasserscheitelwerte von 948 Pegeln für die statistische Auswertung herangezogen, wobei 19 Pegel vom Bayerischen Amt für Wasserwirtschaft und der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 19 Landespegel der Steiermärkischen Landesregierung und 910 Messpegel der hydrographischen Landesdienste und der Wasserstraßendirektion verwendet wurden. Die Länge der einzelnen Pegelreihen variierte sehr stark, wonach man sich einigte, eine Mindestlänge von 5 Jahren festzulegen. Dadurch, dass es während der Bearbeitung des Projektes wiederum zu Hochwasserextremereignissen kam - speziell im Westen - wurden auch Datenreihen aktualisiert oder historische Werte berücksichtigt. Teilweise konnten hydrographische Landesdienststellen sehr gute alte Reihen zur Verfügung stellen, aber auch anthropogene Einflüsse wurden beachtet und die Reihen dadurch qualitativ bewertet. Lage und Einzugsgebiet sowie Evidenzdaten zu den Pegeln wurden ebenfalls herangezogen. In der Phase des sogenannten Präprozessing wurden die Pegelreihen mit jeder zuständigen Landesdienststelle besprochen und mit Hilfe von Spendendiagrammen auf Plausibilität überprüft. Auch Zusatzinformation, welche in den Datenreihen des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) nicht vorhanden waren, konnten in die Bearbeitung einfließen.

Anhand eines Beispiels der beobachteten Pegelreihen kann man oftmals die schwierige Situation zur Bewertung oder Gewichtung eines Ausreißers aufzeigen. Man vergleiche hier die Beobachtungsreihe von Zwettl am Kamp einmal mit und einmal ohne Hochwasserereignis des Jahres 2002 und beachte das Verhalten der verschiedenen Verteilungsfunktionen. Die von HORA verwendete GEV Verteilung (Generalised Extreme Value mit 3 Parametern) liefert mit Extremwert ca.  $300\text{m}^3/\text{s}$ , ohne Extremwert etwa  $147\text{m}^3/\text{s}$ .

Die Pegelabstimmung bestand aus folgenden Schritten:

- Sortieren und zuordnen der Pegel
- Verifizieren der Daten und auf Plausibilität prüfen
- Daten verbessern, nötigenfalls Reihen trennen oder verbinden
- Erheben zusätzlicher Informationen (Daten v. Landes HD aktualisieren, alte Beobachtungen im Kollektiv erweitern)
- Anthropogenen Einfluss berücksichtigen (Ausleitungen, Wehre, etc.)
- Pegelreihen unter 5 Jahre Beobachtungszeitraum konnten nicht berücksichtigt werden
- Extreme Beobachtungen (Ausreißer) wurden hinterfragt und wenn nötig angepasst.

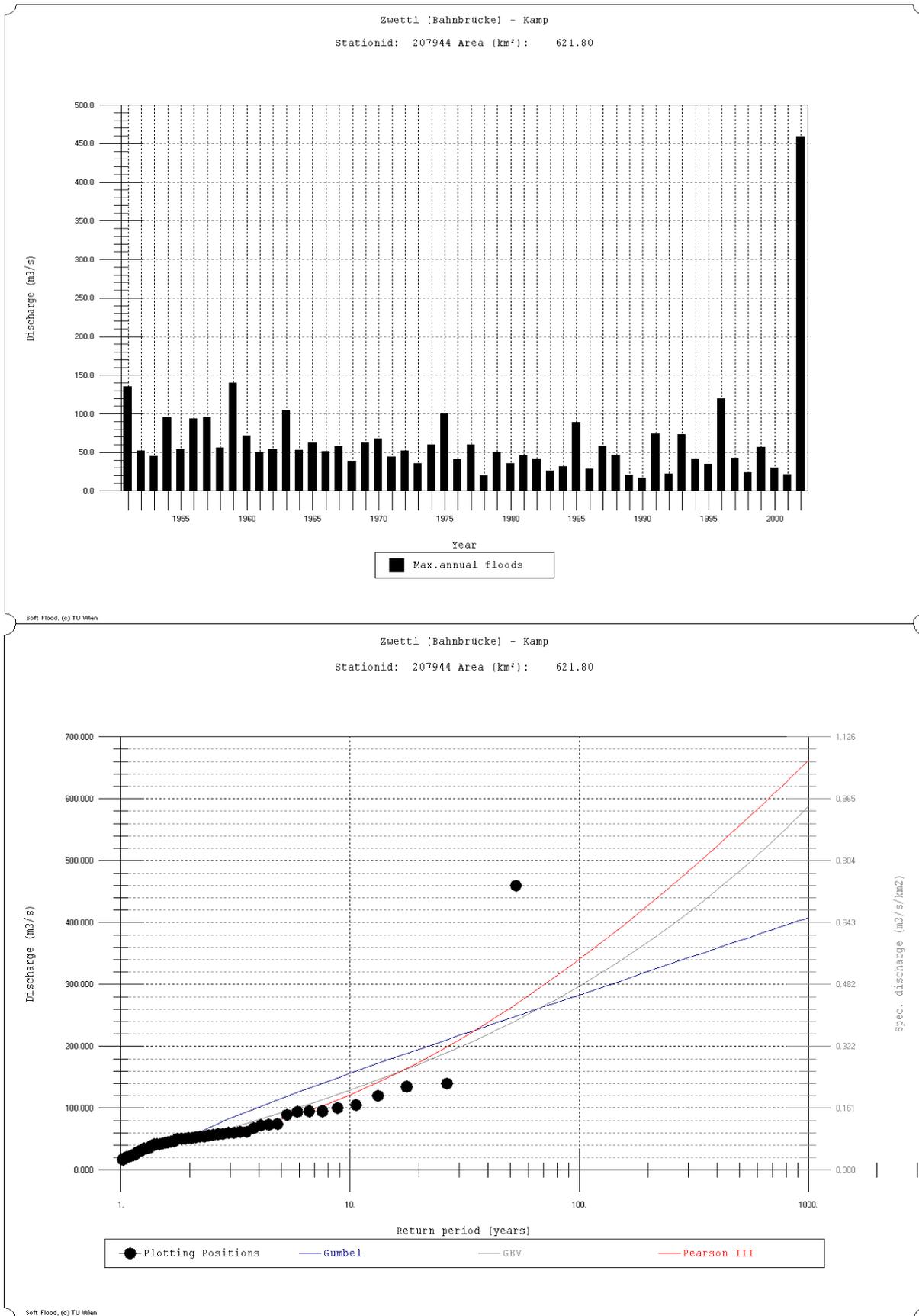


Abb. 1: Pegel Zwettl (Bahnbrücke) mit Ereignis von 2002

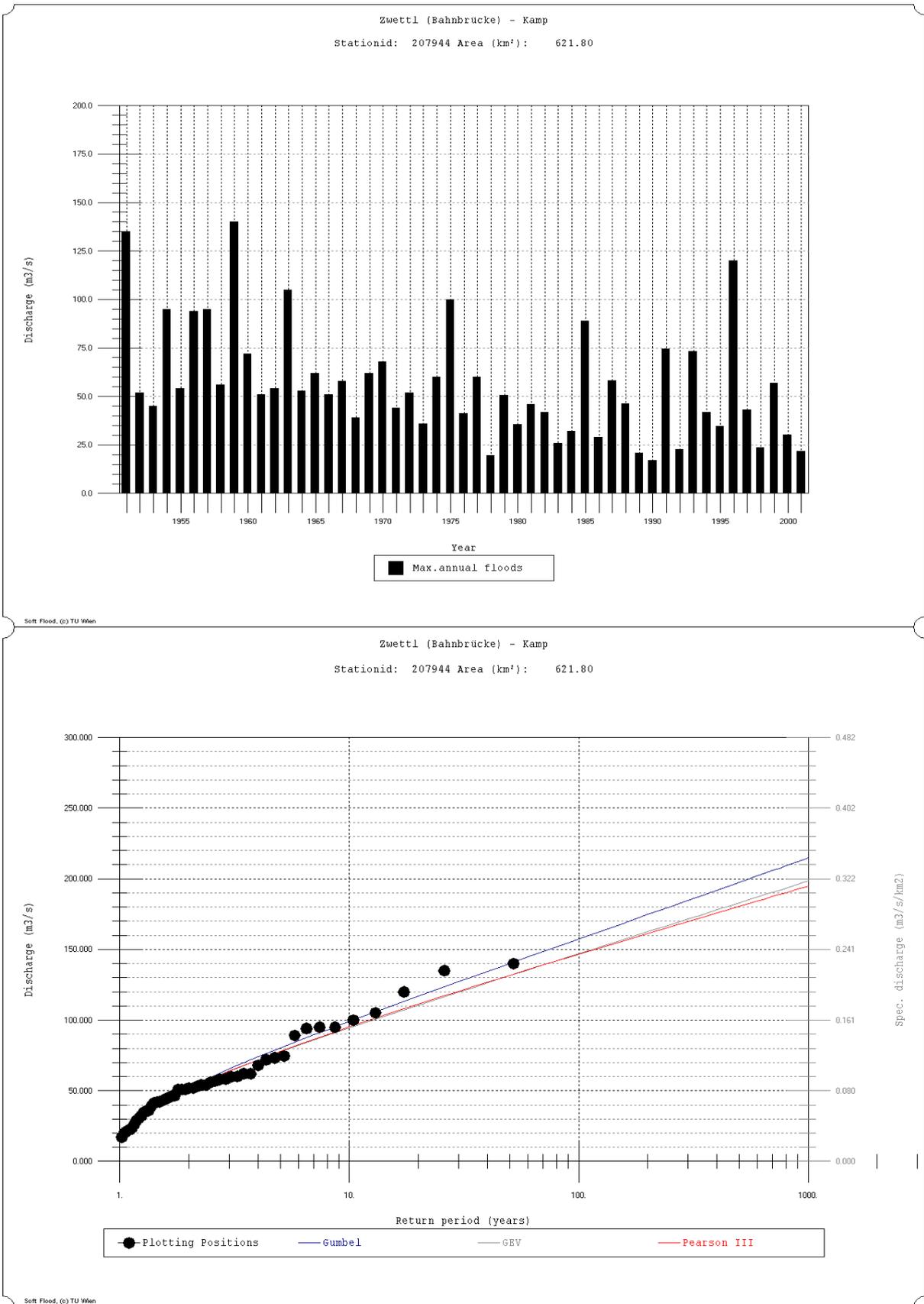


Abb. 2: Pegel Zwettl (Bahnbrücke) ohne Ereignis von 2002

Äußerst wichtig war die wertvolle Erfahrung der Sacharbeiter der einzelnen Landesdienststellen, sowohl der gleichzeitige Austausch von wichtiger landesspezifischer Information, welche direkt als wertvoller Input eingearbeitet werden konnte, als auch die Vergabe von unterschiedlichen Sicherheitszuschlägen innerhalb der Bundesländer und deren Einschätzungen waren neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Hydrologie. Die hervorragende Kooperation zwischen den Landesdienststellen und den Projektbearbeitern des Büros oder des Instituts für Wasserbau ermöglichte eine qualitative Steigerung der Ergebnisse. Erst nachdem alle Landesdienststellen besucht worden waren, konnte mit den ersten Regionalisierungsschritten begonnen werden.

## 2.4 REGIONALISIERUNG

Die Abschätzung von Hochwasserabflüssen einer bestimmten Jährlichkeit für Gebiete ohne Abflussmessungen erfolgte unter Verwendung regionaler Informationen aus benachbarten Gebieten bzw. Pegelreihen und gebietsspezifischer Größen.

Nachdem die Pegeldaten weitgehend aufgearbeitet waren und eine gute Datenbasis geschaffen worden war, konnte mit dem regionalen Abgleich der Gewässerstrecken begonnen werden. Mit Hilfe eines automatischen Verfahrens, dem sogenannten ‚Top-Kriging‘ konnte eine räumliche Korrelation auf unbeobachtete Gewässerstrecken übertragen werden. Das zur Verfügung stehende Modell errechnete Hochwasserabflusswerte von ca. 7700 Knotenpunkten ohne Pegelstellen.

Ein neues Rechenprogramm wurde von der Technischen Universität Wien extra dafür entwickelt. Die Regionalisierung mit Hilfe geostatistischer Verfahren unter Berücksichtigung von Zusatzinformationen erzielt hierbei die besten Ergebnisse. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass eine Gewichtung der Momente vorgenommen wird abhängig von der Distanz und Länge der Pegelreihe. Die Relationen von Ober- und Unterlieger konnten so korrekt berücksichtigt werden, was bei anderen Verfahren nicht möglich ist.

Wichtige Parameter, die bei der automatischen Berechnung noch einfließen, waren u.a.

- der mittlere Jahresniederschlag, welcher ein Indikator für die Abflussbereitschaft von Gebieten ist
- der sogenannte ‚FARL‘- Index, der speziell das Retentionsverhalten von Seen und Speicher automatisch berücksichtigt, wobei der Faktor zwischen 0 und 1 liegt; Seefläche, Seeinzugsgebietsfläche und Einzugsgebietsfläche wurden für die Berechnung benötigt.
- geologischen Gegebenheiten
- der Bewaldungs- und Bebauungsgrad
- die Geländeform und ihr potentiell Retentionsverhalten.

Zur Anwendung kam auch das ‚Gradex-Verfahren‘, das eine grobe Einschätzung des Extrapolationsverhaltens erlaubt. Der Ansatz dieses Verfahrens besteht aus einer

Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einer Hochwasserstatistik durch ein einfaches Niederschlags-Abflussmodell. Hilfreich war das Gradex Verfahren vor allem bei kurzen bzw. unsicheren Reihen, wo es galt einen Variationskoeffizienten als Maß für die Neigung der Verteilungskurve festzulegen. Ein weiterer Aspekt, um hydrologische Gebietseigenschaften zu definieren, war die Schaffung von Regionen mit homogenen Eigenschaften. Nach intensiven Diskussionen konnte man sich schließlich auf 28 Regionen einigen, welchen in erster Linie die meteorologische Charakteristik zu Grunde liegt.

Ein Beispiel soll zeigen, wie komplex im alpinen Gebiet geologische Verhältnisse und Niederschlag, aber auch Nordstaulagen oder vergletscherte Gebiete auf die hydrologischen Bedingungen Einfluss nehmen können.

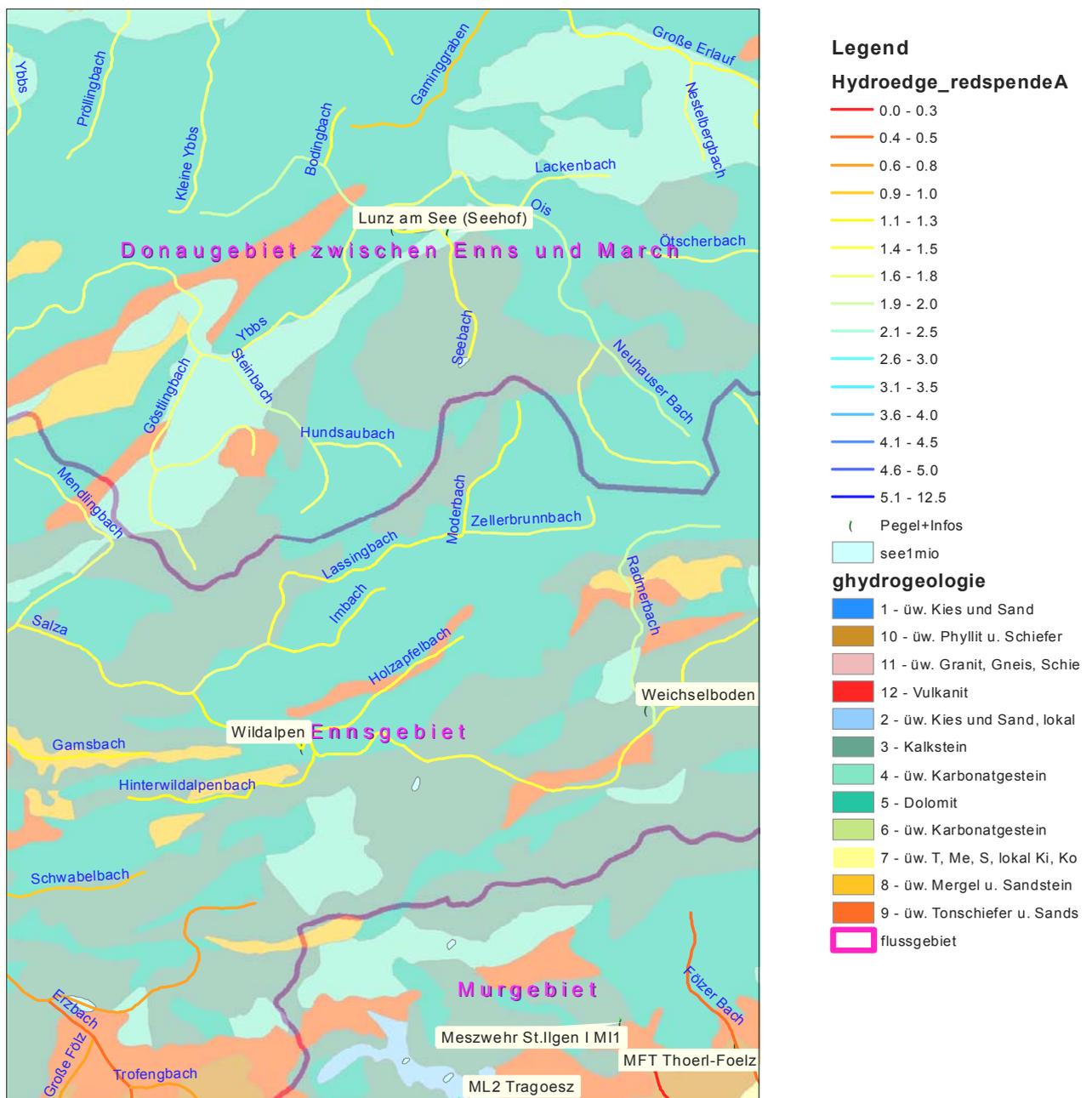
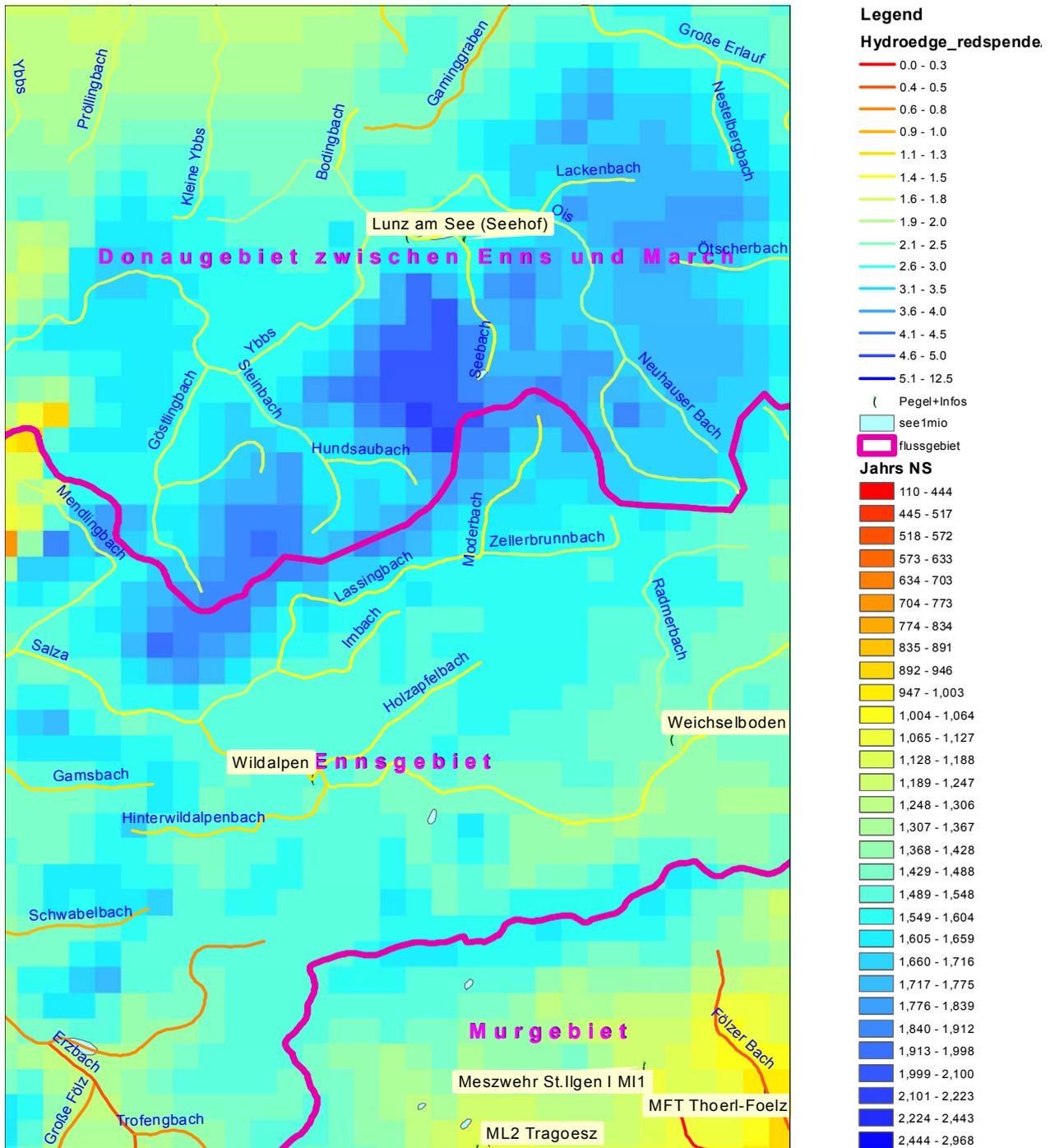


Abb. 3: Beispiel im Bereich des Hochkar für Heterogenität in der Geologie



**Abb. 4:** Beispiel des selben Gebietes für Heterogenität des mittleren Jahresniederschlags

Es lässt sich dadurch leicht anschaulich machen, dass sich durch solche Inhomogenitäten und spezifische regionale Abweichungen der Einsatz von fachlichen Sachbearbeitern und manuellen Eingriffen ins Modell für Optimierungszwecke unverzichtbar ist. Doch nichts desto trotz können hier die Vorzüge eines automatisierten Berechnungsverfahrens, welche das Handling von solch enormen Datenmengen erst erlauben, und dem regionalen bis lokalen Expertenwissen zu einem beispiellosen Projekt vereint werden.

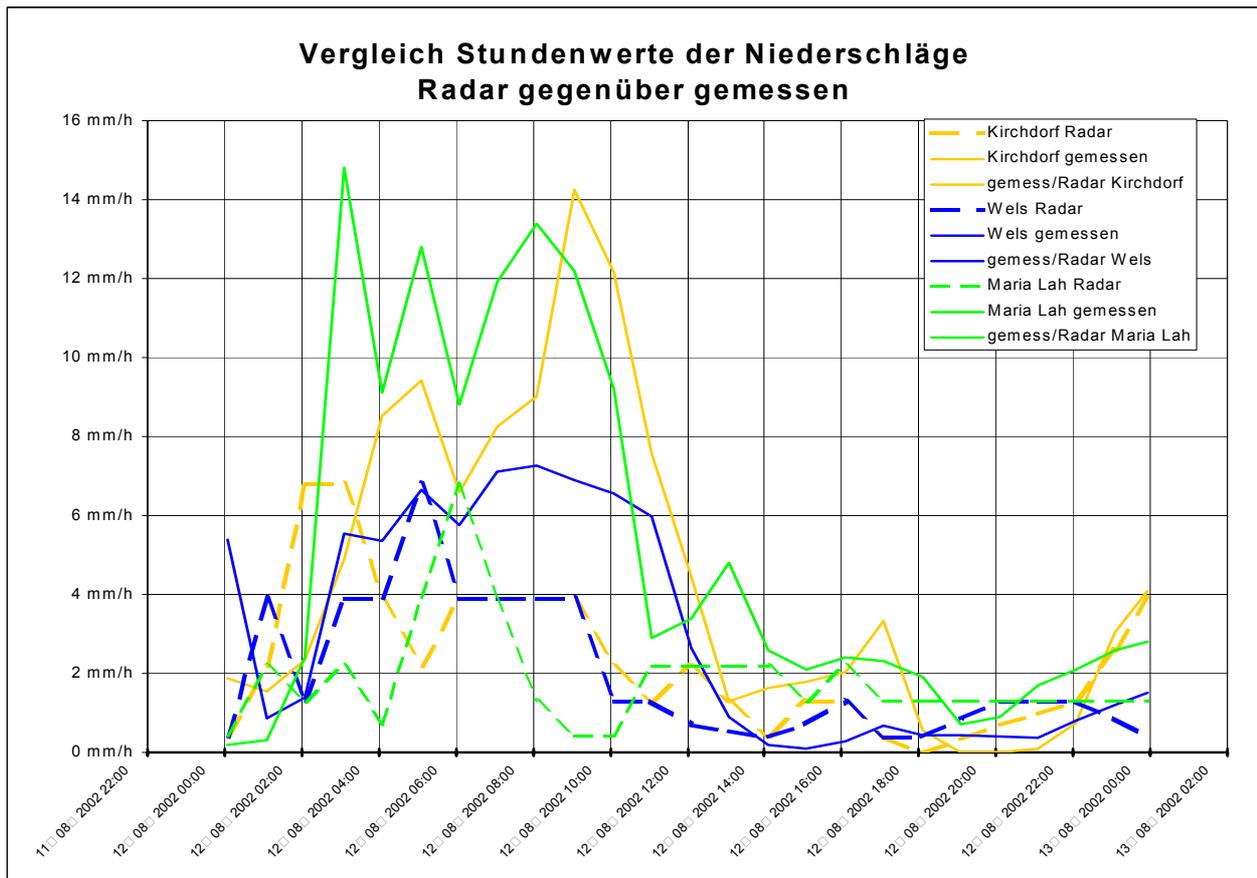
### 3. REGIONALISIERUNG VON GEBIETSPARAMETERN FÜR NA-MODELLE

In letzter Zeit wird im Hochwasserschutz sehr stark auf Rückhaltebecken gesetzt. Rein lineare Maßnahmen wie Regulierung, Ufermauer usw. werden aus ökologischen Gründen nicht mehr als zeitgemäß angesehen und daher auf nicht anders schützbar dicht verbaute Siedlungsbereiche beschränkt.

Bei der Planung von Rückhaltebecken wird oft das ganze Abflusssystem eines Einzugsgebietes untersucht, wofür als Werkzeug ein NA- Modell verwendet wird. In Österreich werden hauptsächlich die Programmpakete des IHW Karlsruhe (Vertrieb: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, TH Karlsruhe) und HEC-HMS (Vertrieb: Scisoftware) bzw. WMS (Vertrieb: Scisoftware) verwendet. Alle Pakete bieten verschiedene Hydrologische Verfahren für die Einzelnen Teilschritte an. Je nach Verfahren werden unterschiedliche Parameter Flächendeckend benötigt. Das reicht von einem CN- Wert für das SCS- Verfahren über 3 Werte (verfügbares Porenvolumen, Saugspannung und gesättigte  $K_f$ - Wert) beim Green & Ampt Verfahren (G&A) bis zu 12 Parametern für ein Bodenfeuchtemodell. CN- Werte gibt es nicht flächig, für das G&A- Verfahren liegen ebenfalls keine regionalisierten Werte vor, für das Bodenfeuchtemodell schon gar nicht. Möchte man die Verdunstung bei längeren Zeitabschnitten berücksichtigen, wird die Datenlage noch trauriger.

Für das G&A- Verfahren konnten wir aus der digitalen Bodenkarte Information über die Böden ableiten. Die einzelnen Bodentypen haben wir klassifizierten Typen zugewiesen, für welche die 3 Bodenkennwerte des G&A- Verfahrens tabelliert vorliegen. Über GIS- Auswertungen wurden diese Parameter auf Teileinzugsgebiete umgerechnet. Es zeigte sich bei der Kalibrierung allerdings, dass die Werte sehr stark manuell anzupassen sind. Automatische Anpassungsroutinen in HEC- HMS versagten bei einer größeren Anzahl von Teileinzugsgebieten (in diesem Fall 20 für Teilanschnitte des Einzugsgebietes). Für unbeobachtete Gebiete wären die resultierenden Abflüsse grob falsch gewesen. Das Bodenfeuchtemodell würde zwar die physikalischen Vorgänge relativ gut abbilden, aber die große Zahl von Modellparametern macht die Anwendung fast unmöglich. Der Schluss daraus ist, dass für die Modellierung unbeobachteter Gebiete oft nur der Vergleich mit ähnlichen benachbarten Gebieten bleibt. In Bayern ist man den Weg gegangen, anhand gemessener Hochwasser Gebietsparameter rückzurechnen und zu regionalisieren. So liegen zumindest CN- Werte und Kennwerte für das Lutz- Verfahren vor.

Eine zweite wichtige Inputgröße für NA- Modelle ist der Regen. Wir hatten gehofft, für ein Modell der Krems mit 350 km<sup>2</sup> Einzugsgebiet die Daten des Regenradars verwenden zu können, um „künstliche Regenschreiber“ kreieren zu können. Leider stellte sich heraus, dass an den beobachteten Stationen keine Übereinstimmungen zwischen Schreibern und Radardaten bestand.



**Abb. 5:** Divergenz zwischen Regendaten der Schreiberstation (durchgezogene Linie) und der Radarauswertung (strichlierte Linie) für die Intensität in mm/h.

Zusätzliche Hindernisse für die Verwendung der Radardaten sind, dass...

- die Regenintensitäten nur als Klassenwerte und nicht als kontinuierliche Messgrößen vorliegen
- die Sensitivität der Messung mit der Entfernung von der Radarstation abnimmt
- Abschattungseffekte durch Gebirge und Höhenrücken bestehen
- die Stationsdichte für hydrologische Auswertungen zu klein ist.

Wenn man sich bei Branchenkollegen umhört, wird man bemerken, dass die Herangehensweise an NA- Modelle und die verwendeten Verfahren und Wahl der Parameter sehr unterschiedlich ist. Vermutlich würden verschiedene Büros zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen für unbeobachtete Gebiete kommen.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Als Grundlage für Regionalisierung von Hochwasserabflüssen stellt das Projekt HORA eine enorme Weiterentwicklung für ein bundesweit einheitliches Verfahren dar, bei dem große Datenmengen und Expertenwissen zusammenfließen. Leider ist bei vielen anderen hydrologischen Größen der Schritt in eine Regionalisierung noch nicht

gemacht, der Hydrologische Atlas von Österreich und HORA stellen zumindest große Schritte in diese Richtung dar.

## 5. AUSBLICK

Es wäre wünschenswert, dass der hydrologische Teil von HORA von Zeit zu Zeit mit den neuen Abflussdaten aktualisiert wird und die Verfahrensentwicklung weiter durchgeführt werden kann.

Es wäre weiterst wünschenswert, dass für die Verwendung von NA- Modellen

- für Österreich brauchbare Verfahren entwickelt oder vorhandene angepasst werden
- Empfehlungen für eine „homogene“ Anwendung herausgegeben werden
- die benötigten Parameter regionalisiert bereit gestellt werden
- die Qualität der Regenradardaten für die hydrologische Anwendung verbessert wird.

Die Regionalisierung bezogener Abflusseigenschaften von Einzugsgebieten kann somit als Ziel zukünftiger Forschungstätigkeit gesehen werden, um zufriedenstellende Ergebnisse von den bereits vielfach verwendeten NA-Modellen erhalten zu können oder für Österreich angepasste Verfahren einsetzen zu können.

## 6. LITERATUR

Becker, M. und Rosemann, H.-J. (1995) Regionalisierung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete in Bayern — ein Beitrag zur Bereitstellung hydrologischer Planungsgrundlagen, TU München, Fachgebiet und Laboratorium für Hydromechanik, Heft 61/1995.

Blöschl, G., Piock-Ellena, U. und Merz, R. (2000) Abflußtypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Endbericht an die Österreichische Akademie der Wissenschaften, (HÖ-12/97), Feb. 2000, Institut für Hydraulik, TU Wien.

Merz, R. (2002) Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. Wiener Mitteilungen, Wasser - Abwasser - Gewässer, Band 181, Wien, ISBN 3-85234-072-3; 198 pages.

**Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. Günter Humer

Alexander Hochhold

Dipl.-Ing. Wolfgang Wührer

Dipl.-Ing. Michael Hofer

Dipl.-Ing. Humer, Ingenieurbüro für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

4682 Geboltskirchen 70

Tel.: 07732 - 4146, Fax DW - 22

E - Mail: [office@ib-humer.at](mailto:office@ib-humer.at)

## **REGIONALISIERUNG VON HYDROLOGISCHEN KENNWERTEN IN KÄRNTEN**

Johannes Moser

### **1. Einleitung**

Grundsätzlich gibt es zu diesem Thema bereits eine Menge an Daten und Auswertungen. Mit gängigen GIS-Softwares kann unter Anwendung verschiedener Interpolationsverfahren (einfache Verfahren bis Kriging) eine „Regionalisierung“ rasch und beinahe automatisiert vorgenommen werden. Doch der Schein trügt des Öfteren. Es gibt viele Ausnahmen. Die hydrologischen Gegebenheiten sind innerhalb von benachbarten Flussgebieten zum Teil doch sehr unterschiedlich. Verursacht durch natürliche Gegebenheiten wie unterschiedliche Topographie/Höhenlage, Meteorologie-, Geologie-, Boden-, Versickerungs- und Vegetationsverhältnisse oder auch durch anthropogene Einwirkungen, wie Kraftwerksausleitungen, Hochwasserrückhaltebecken etc.

Sehr wesentlich ist die Messnetzdicke für den Erfolg einer Regionalisierung von hydrologischen Kennwerten. Im Gebirge liegt wegen der schwierigen Messbedingungen ein großer Mangel vor. Ist die Übertragung von Kennwerten von beobachteten Gebieten in nicht beobachtete Gebiete mit doch unterschiedlichen Gegebenheiten so ohne weiteres möglich? Gibt es Zusammenhänge zwischen beobachteten und nicht beobachteten Gebieten? Eine diesbezügliche Überprüfung ist zuvor jedenfalls angebracht. Gezielte Einzelmessungen in nicht beobachteten Gebieten können dabei etwas mehr „Sicherheit“ schaffen. Wichtig für jede Art der Regionalisierung ist daher die gründliche Recherche nach Besonderheiten/Zusammenhängen/Korrelationen im Gebiet als auch bei den hydrologischen Kennwerten der Pegel/Stationen.

Allein die statistische Auswertung und Homogenisierung von Niederschlags- und Abflussdaten ist ein Kapitel für sich, das hydrologische Fachkenntnisse erfordert und verschiedene Interpretationen zulässt. Zumeist hat man es mit unterschiedlichen Dauern der Zeitreihen zu tun. Dies ist z.B. bei Nieder- und Hochwasser von Interesse. Es können Einzelmessungen und -ereignisse (historische Hochwässer) als auch kürzere und lange Zeitreihen vorliegen. Die Qualität der Zeitreihen ist zu überprüfen. Hat es innerhalb der Messreihe Änderungen im Einzugsgebiet gegeben, z.B. Verringerung des wirksamen Einzugsgebietes durch Aus- bzw. Ableitungen zu Kraftwerken? In Kärnten gibt es jede Menge großräumige Veränderungen der Abflüsse durch Kraftwerke (Abb. 1). Pegel mit Beeinflussung durch Kraftwerksschwellbetrieb sind nicht geeignet, um hydrologische Kennwerte auf das Gebiet zu übertragen.

Niederwasserabflüsse von Flüssen sind nicht unbedingt auf die Zubringer übertragbar. Es kann ein völlig anderes saisonales Verhalten bei Niederwasser vorliegen, z.B. Winterniederwasserminima an Flüssen und im Hochgebirge bzw.

Sommerniederwasserminima an Zubringern. Des Weiteren ist es zusätzlich zur Auswertung, Analyse und Interpretation der hydrologischen Kennwerte der Pegel und Messstationen auch wichtig nach ähnlichen Kriterien des Gebietes Ausschau zu halten, die für bestimmte Regionen gelten. In der Regel erkennt man ähnliche Gebiete bereits an den hydrologischen Kennwerten. Man kann dies auch als Grobregionalisierung von Gebieten verstehen.

Die Topographie spielt in der Hydrologie eine sehr wichtige Rolle. Das Verhalten der Niederschläge und Abflüsse ist im Hochgebirge ein anderes, als im Flachland. In Kärnten finden wir vergletschertes Hochgebirge mit Gipfeln über 3000 m bis zu hügeligen, ebenen Flusseinzugsgebieten, wie z.B. im Klagenfurter Becken. In Hinblick der Topographie lässt sich Kärnten hydrologisch wie folgt gliedern (Abb. 2):

- Bereich der Hohen Tauern (Flussgebiet Möll und Lieser, wobei die Lieser auch einen Teil des Nockgebietes entwässert.
- Nockgebiet/Gurktaler Alpen (Flussgebiet Lieser und Obere Gurk, Metnitz, Tiebel...)
- Osttirol, Kreuzeckgruppe/Gailtaler Alpen (Flussgebiet Obere Drau, Gail)
- Karnische/Julische Alpen (Flussgebiet Gail und Gailitz)
- Karawanken (Flussgebiet Vellach und Karawankenbäche, untere Drau)
- Zentralraum Klagenfurter Becken, Wörthersee, Glantal (Flussgebiet Glan, untere Gurk)
- mittleres Gurktal, Metnitzer- u. Wimitzer Berge (Flussgebiet mittlere Gurk, Wimitz, Glan)
- Saualm Süd-West: (Flussgebiet Görtschitz, Haimburgerbach, Wurlabach)
- Lavanttal (Flussgebiet Lavant)

Wesentliche Geologie Kärntens (Abb. 3):

- Nördlich der Drau vorwiegend kristalliner Schiefer punktuell mit einigen Kalkzonen, Gneis in den hohen Tauern.
- Südlich der Drau vorwiegend Kalk mit Schieferzonen. In den Tal und Beckenlagen quartäre Kies Füllungen.

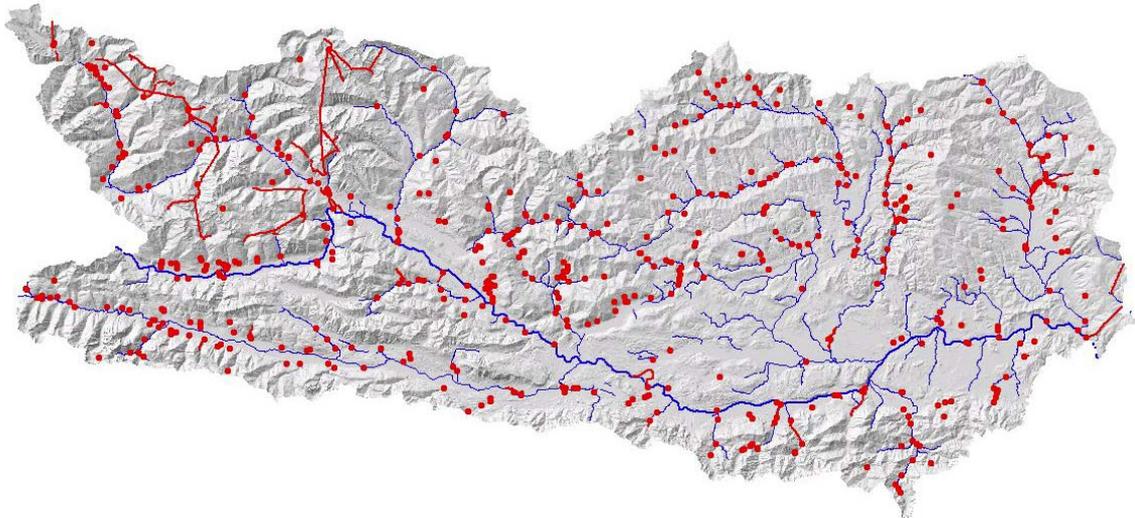


Abb. 1: Kraftwerke und Ableitungen in Kärnten lt. Wasserbuch

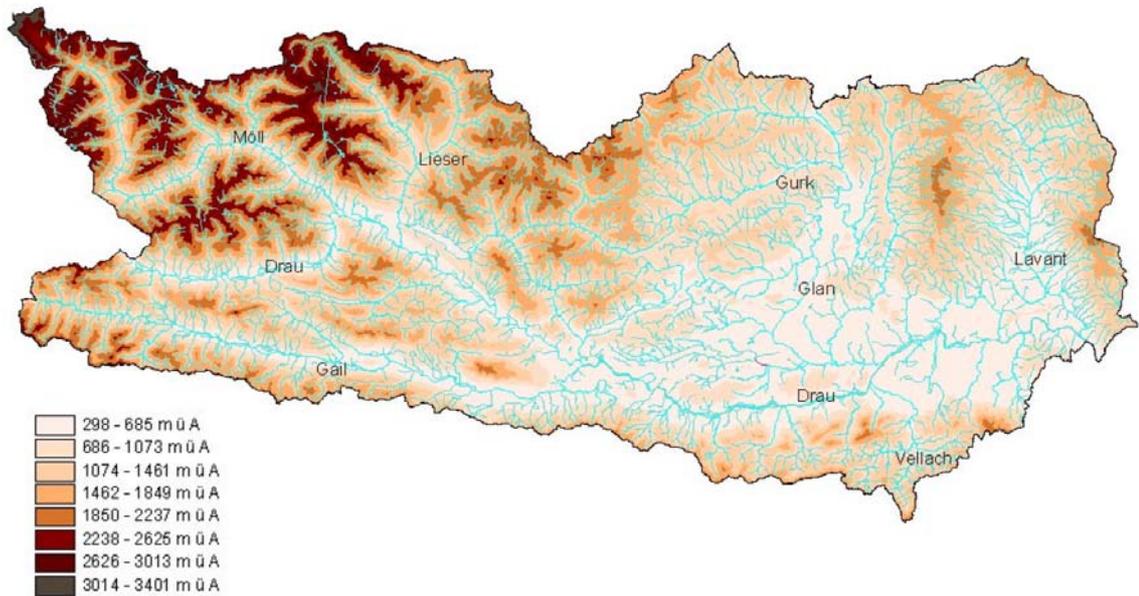


Abb. 2: Topographie bzw. Höhenzonen und Gewässernetz von Kärnten.

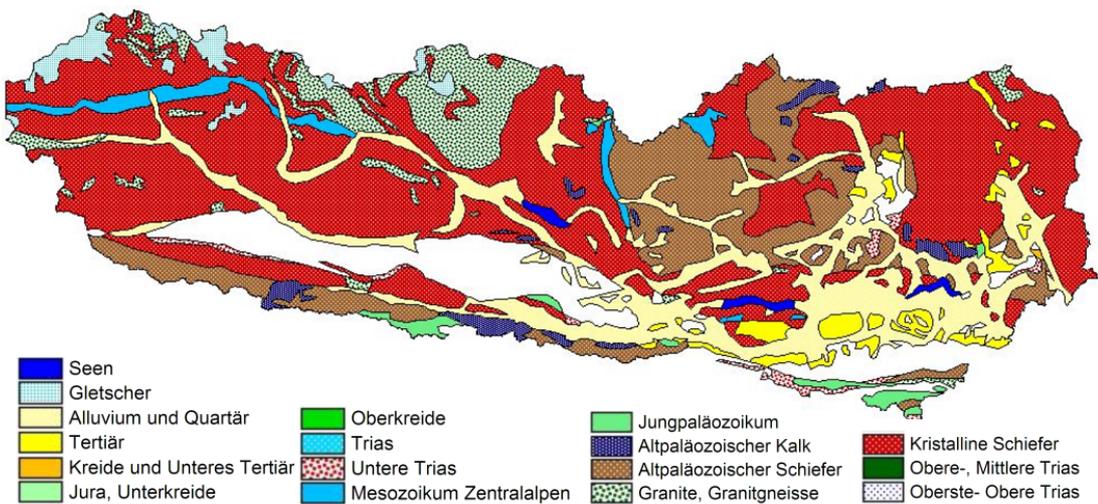
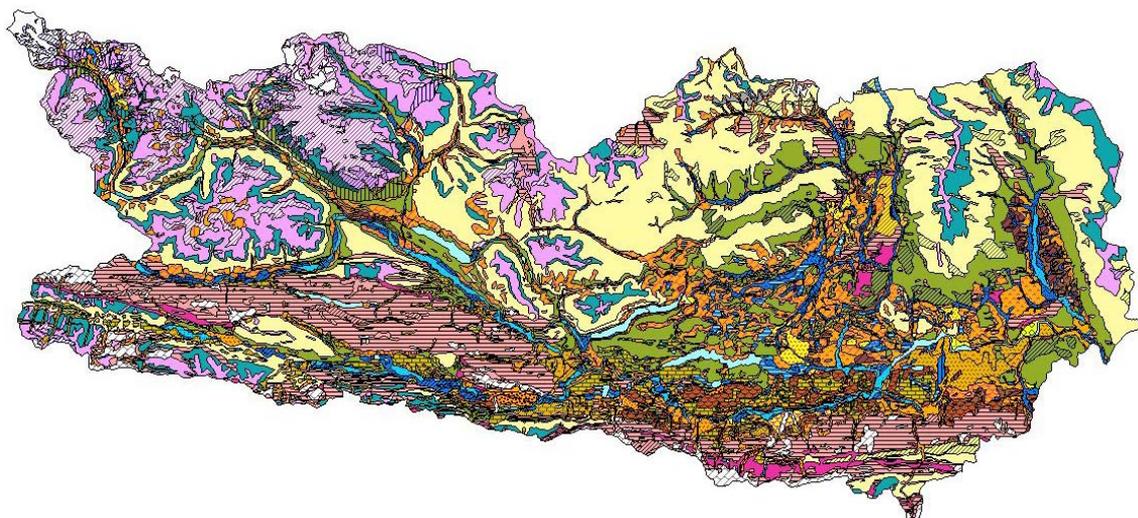
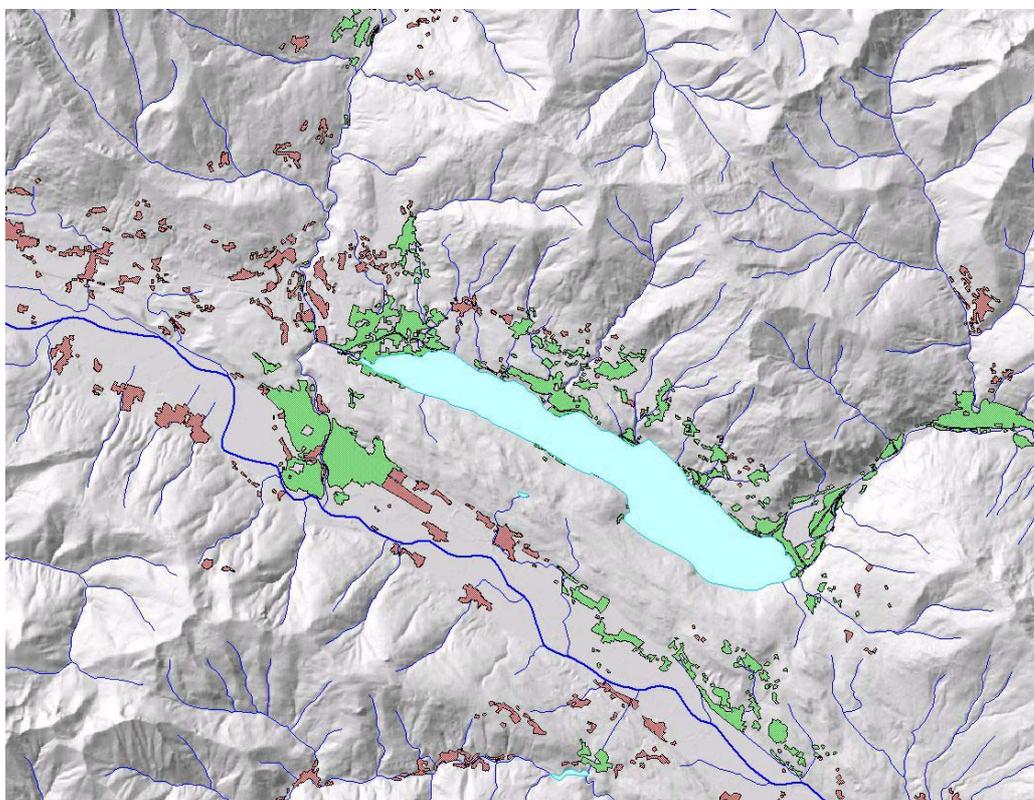


Abb. 3: Geologie von Kärnten und Osttirol



**Abb. 4:** Bodenkarte von Kärnten (Legende im Kärnten Atlas)



**Abb. 5:** Anthropogener Einfluss (Kanalisation in Siedlungsgebieten) im Raum Millstätter See.

## 2. Niederschlag in Kärnten

Neben der Topographie sind die meteorologischen Verhältnisse sehr wesentlich. Kärnten ist geprägt von zwei typischen Wetterlagen, welche in unserem Bundesland für Niederschläge sorgen.

Die West-Wetterlage (Tief vom Atlantik) sorgt zumeist im Nordwesten Kärntens - im Bereich der Hohen Tauern - für Niederschläge, wobei der Alpenhauptkamm häufig eine Wetterscheide darstellt, das heißt, nördlich davon regnet oder schneit es ergiebig, und etwas weiter im Süden bleibt es trocken.

Die Südwestlage (Mittelmeertief) ist maßgebender an den Niederschlägen für Kärnten beteiligt. Aufgrund der geographischen, topographischen (Karnische Alpen und Karawanken) und meteorologischen Gegebenheiten finden zumeist im Bereich des Gailtales die ergiebigsten Niederschläge statt.

Aufgrund von langjährigen Beobachtungen des Hydrographischen Dienstes kann folgendes Niederschlagsverhalten dargestellt werden (Abb. 6):

Im Süd-Westen Kärntens, also im Gail und Lesachtal, aber auch im oberen Drautal treten in den Tallagen jährliche mittlere Niederschlagssummen von 1100 mm bis 1500 mm auf. Die Niederschlagsmengen nehmen mit der Geländehöhe aufgrund der Höhenlage und Stauwirkungen deutlich zu, das heißt im Gebirge regnet es mehr. Die Station Naßfeld weist zum Beispiel eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 2300 mm auf, wobei auch Höchstwerte von 3000 mm im Jahr überschritten wurden. Ähnlich verhält es sich im Bereich der Hohen Tauern, jedoch mit noch geringeren Niederschlägen in den Tallagen. So verzeichnet z.B. die Talstation Heiligenblut 850 mm Jahresniederschlag, während am Sonnblick ca. 2600 mm als langjähriges Mittel gemessen wird. Ein Grund für diese großen Unterschiede ist in der Abschottung durch das Hochgebirge zu sehen. Sehr viel anders ist hingegen das Niederschlagsverhalten im Nord-Osten Kärntens, im Speziellen im Lavanttal und Bereich Krappfeld, aber auch im flachen Zentralbereich. Hier liegen die Jahresmittelwerte um die 750 - 950 mm im Talbereich und am Berg z.B. auf der Koralpe nur mehr um 1300 mm. Es ist also ein deutliches Gefälle im Gebietsniederschlagsverhalten von West-Süd nach Nord-Ost gegeben. Das widerspiegelt sich auch in den Abflüssen.

Neben dem Jahresniederschlagsverhalten spielen besonders bei Hochwässern die Wetterzugstraßen (Abb. 7) eine große Rolle bei der Regionalisierung. Es ist aus Pegelaufzeichnungen und Beobachtungen der Häufigkeit und des Ausmaßes der Ereignisse deutlich erkennbar, dass an Wetterzugstraßen und deren Staubereichen höhere hydrologische Kennwerte vorliegen. Von Süden her gibt es Wetterstraßen entlang des Kanaltales über den Plöckenpass, das Nassfeld bzw. in Richtung Villach. Das Hochwasserereignis in Vorderberg 2003 war typisch für Ereignisse entlang von Wetterzugstraßen (sehr lokal begrenzte konvektive Niederschlagsschwerpunkte in Fronten eingelagert). Weiters gibt es Wetterzugstraßen über den Seebergsattel und östlich der Petzen. Vom Norden her über den Felbertauern (Isel), das Gasteinertal, und dem Katschberg. Besonders bei unbeobachteten Gebieten ist bei der Festlegung von Bemessungshochwässern das Wissen um Wetterzugstraßen und Staubereiche zu berücksichtigen. Zumeist lässt sich dies nur empirisch bzw. anhand von Ereignissen aus beobachteten Gebieten an Wetterzugstraßen bewältigen.

Eine besondere Herausforderung stellt bei der Regionalisierung die Einbeziehung der Änderung der hydrologischen Kennwerte mit der Seehöhe dar. Die Höhenabhängigkeit des Niederschlags, aber auch damit der Abflüsse ist aufgrund fehlender Niederschlagsstationen/Abflusspegel nur sehr vage einschätzbar. Dennoch lässt sich auf Basis eines digitalen Höhenmodells und Auswertungen der bestehenden Niederschlagsstationen eine höhenbezogene Niederschlagsverteilung ganz „brauchbar“ ermitteln. Der Vorteil dieser Regionalisierung ist, dass die natürlichen

Gegebenheiten besser einfließen und daher die Gebietsniederschläge genauer ermittelbar sind.

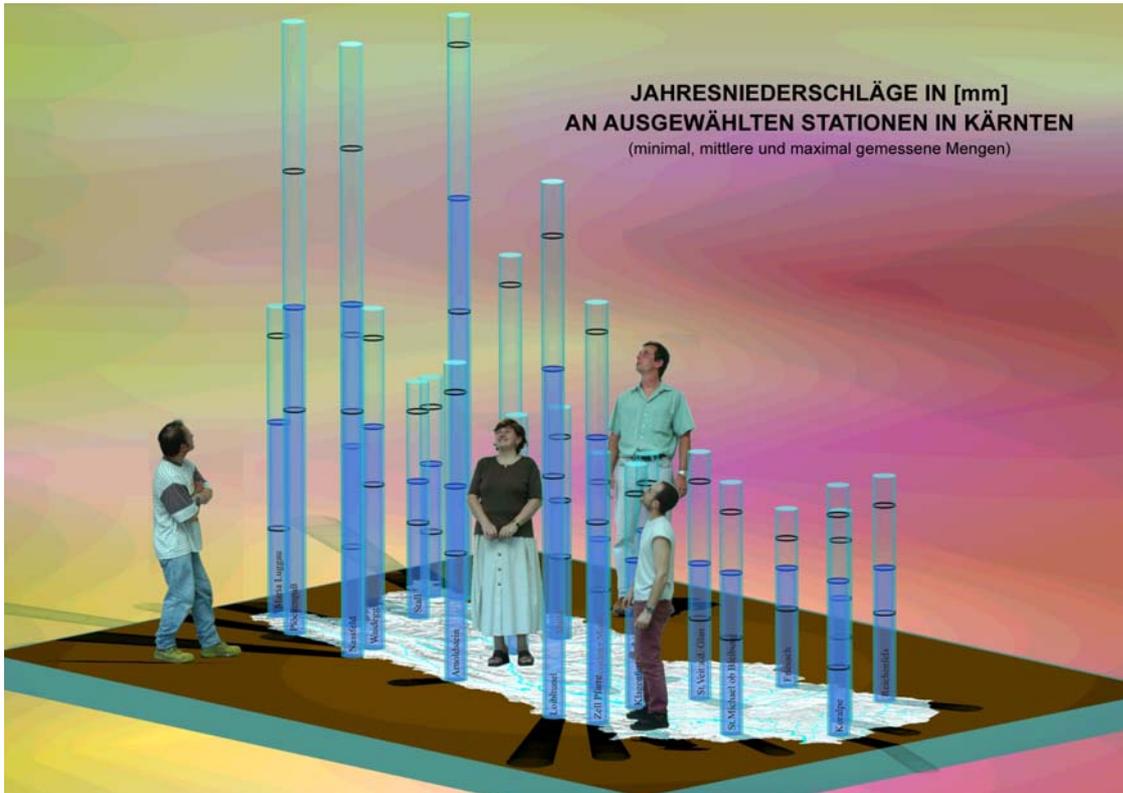
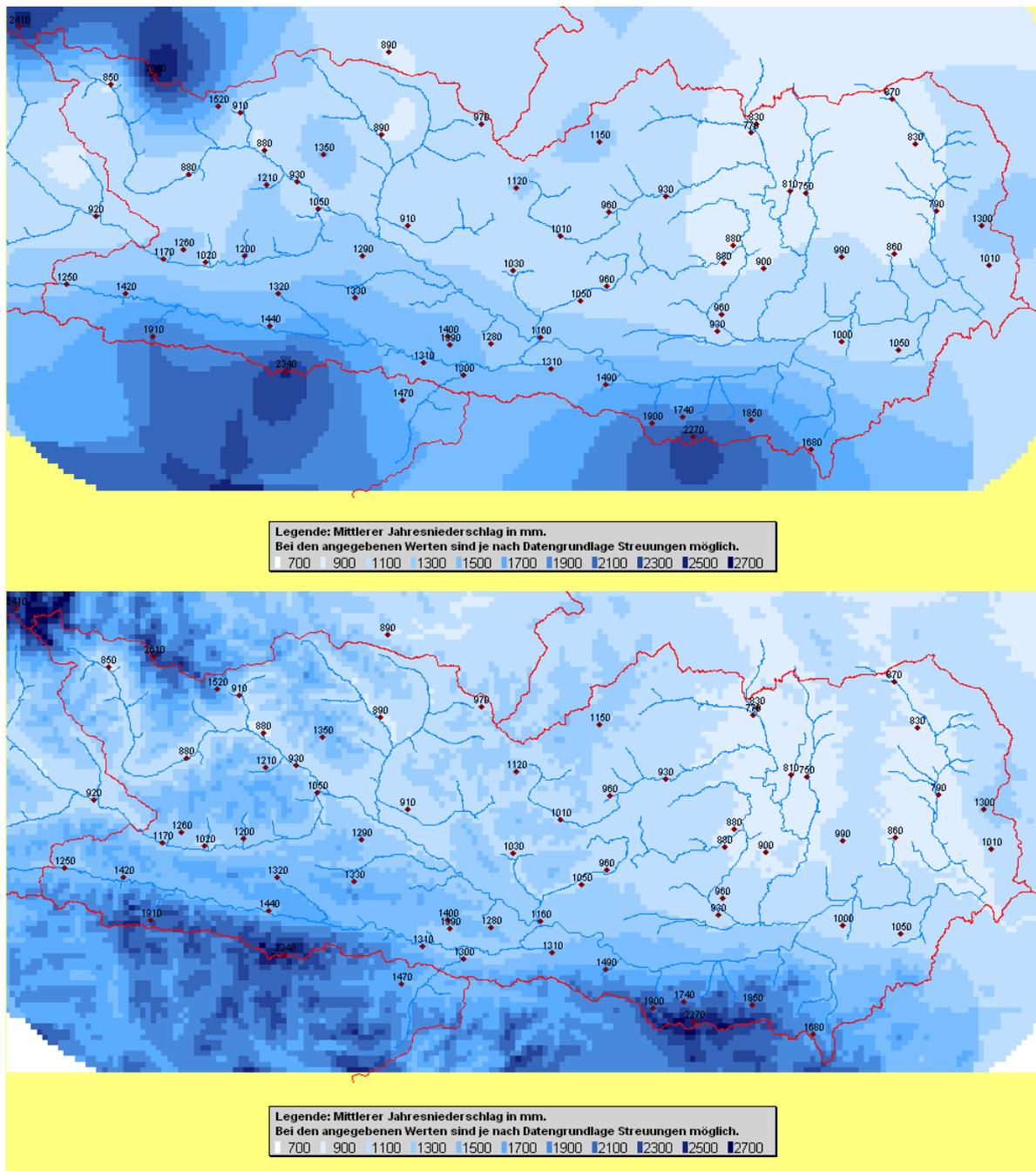


Abb. 6: Max. mittlere und min. Jahresniederschläge in Kärnten; Säulenmodell (Moser)



Abb. 7: Wetterzugstraßen bei Fronten von Süden und Norden (Tscharda)



**Abb. 8:** Regionalisierte mittlere Jahresniederschläge in Kärnten: Oben: Flächenhafte Regionalisierung ohne Berücksichtigung der Topographie. Unten: Regionalisierung unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit des Niederschlages (Kopeinig / Moser).

In Abb. 8 (oben) ist der flächenhaft regionalisierte mittlere Jahresniederschlag für Kärnten ohne Berücksichtigung der Topographie und in Abb. 8 (unten) die regionalisierten Werte unter Berücksichtigung der Topographie dargestellt. Der Unterschied der Methoden ist nicht nur in der räumlichen Verteilung des mittleren Jahresniederschlages erkennbar, sondern auch in der Quantität der Gebietsniederschläge. So beträgt der Gebietsniederschlag z.B. für das obere Mölltal (Pegel Winklern) mit flächenhafter Regionalisierung 1069 mm, während mit höhenbezogener Regionalisierung 1415 mm an Gebietsniederschlag vorliegen. Besonders im Gebirge weist sich die flächenhafte Regionalisierung als unzureichend,

da aufgrund fehlender Höhenstationen der Niederschlag zu gering verteilt wird. Die Zunahme mit der Geländehöhe wird unterschätzt. In der Ebene/Hügelgebiet ist der Unterschied nicht mehr so wesentlich. Tal- und Gebirgsniederschläge grenzen sich unter Berücksichtigung von Topographie und Höhenabhängigkeit des Niederschlages jedoch deutlich ab.

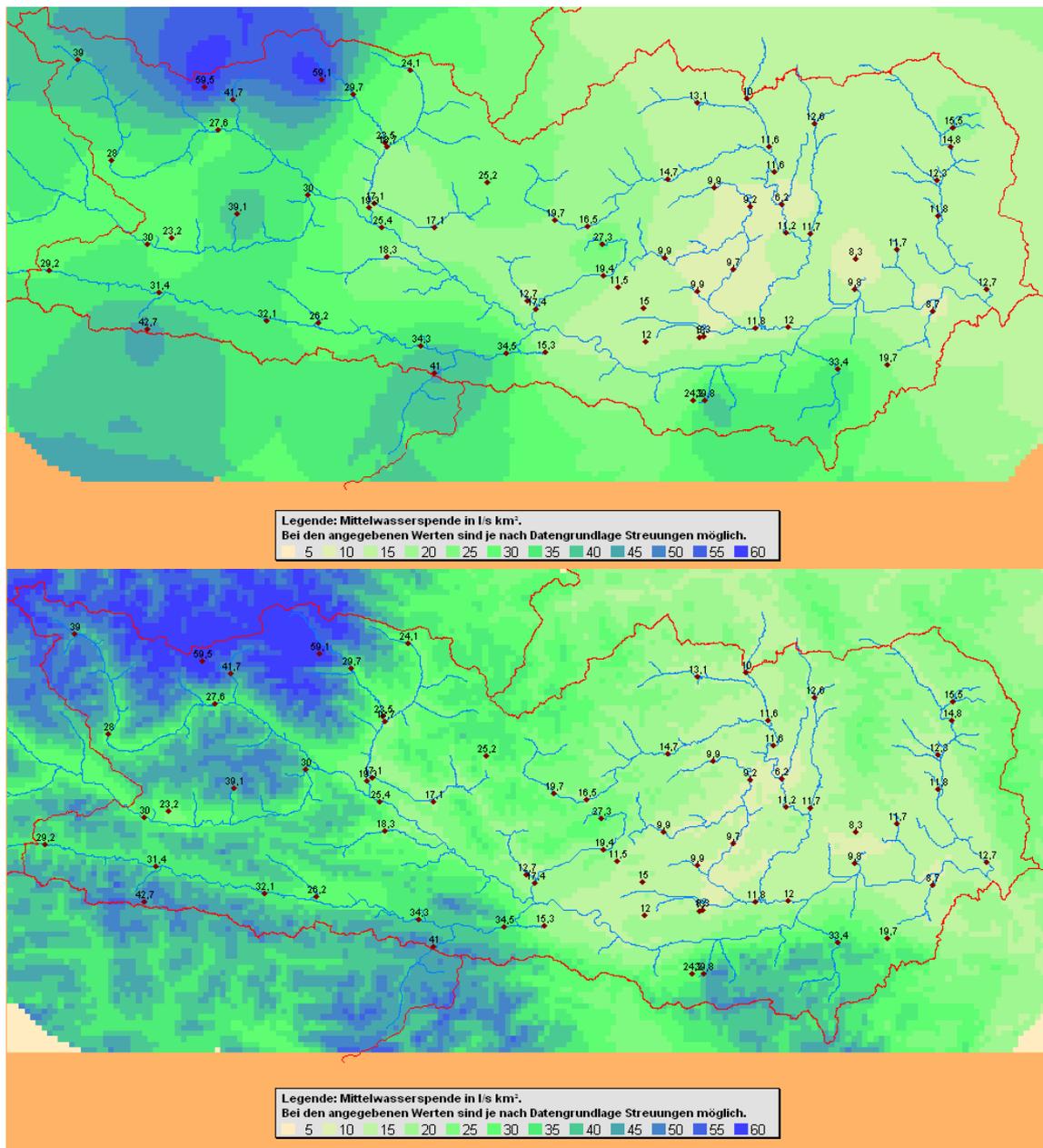
### **3. Nieder- und Mittelwasserspenden in Kärnten**

Die regionale Verteilung der Mittelwasserspenden (Abb. 9) ist natürlich entsprechend der Niederschlagsverteilung auch höhenabhängig, jedoch nicht in dem Ausmaß wie bei den Niederschlägen, da das Wasser von höheren Regionen auch im Tal wirksam wird. Auch hier sind bei Anwendung verschiedener Regionalisierungsmethoden die Vorteile der Einbindung von Topographie und Höhenabhängigkeit klar erkennbar (Abb. 9). Die Anpassung der Werte an das Gelände ergibt ein genaueres und realeres Bild der Mittelwasserabflussspenden. In Karstgebieten gelten für die verschiedenen Höhenlagen die Werte nicht.

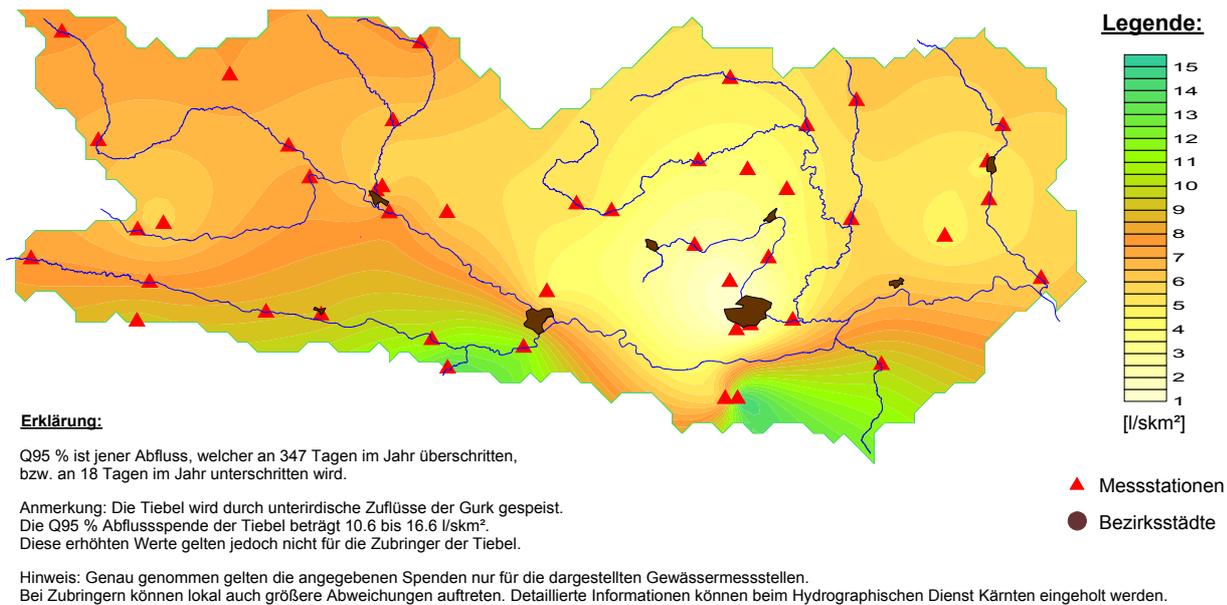
Extrem schwierig ist die Regionalisierung von Niederwasserspenden (Abb. 10), da sehr viele Einflüsse hierbei gegeben sind und das Niederwasserverhalten selbst auf kleinem Raum schon sehr unterschiedlich ist. Bei Verwendung der dargestellten Regionalisierungskarten sind detaillierte Fachkenntnisse daher unbedingt hinzuzuziehen (z.B. Wissen über Versickerungen, Ausleitungen, Karst etc.). Die Karten (Abb. 10) ersetzen nicht die hydrologischen Gutachten der Hydrographie, doch sollen sie eine Groborientierung der Abflussverhältnisse ermöglichen.

### **4. Regionalisierung von Hochwasserkennwerten in Kärnten**

Die Grundlage zur Festlegung der Bemessungshochwässer mit hundertjähriger Auftretswahrscheinlichkeit bilden vordergründig die statistischen Auswertungen der Abflusspegeln. Die Auftretswahrscheinlichkeit von Hochwasserabflüssen kann meiner Meinung nach nur mit Hochwasserstatistik von Abflusspegeln und Regionalisierung dieser Ergebnisse bestimmt werden. Die Berechnung von HQ100 über Niederschlags-Abflussmodelle kann lediglich in zweiter Folge und ergänzend als Methode herangezogen werden. Unsicherheiten bei der Ermittlung von HQ100 mit NA Modellen ergeben sich durch die unterschiedliche Jährlichkeit von Niederschlag und Abfluss. Ein 100-jährlicher Niederschlag ergibt nicht automatisch ein HQ100 an Abfluss. Es stellt sich auch die Frage, wie groß der Flächenabminderungsanteil des Niederschlages und der entsprechende Abflussbeiwert ist.



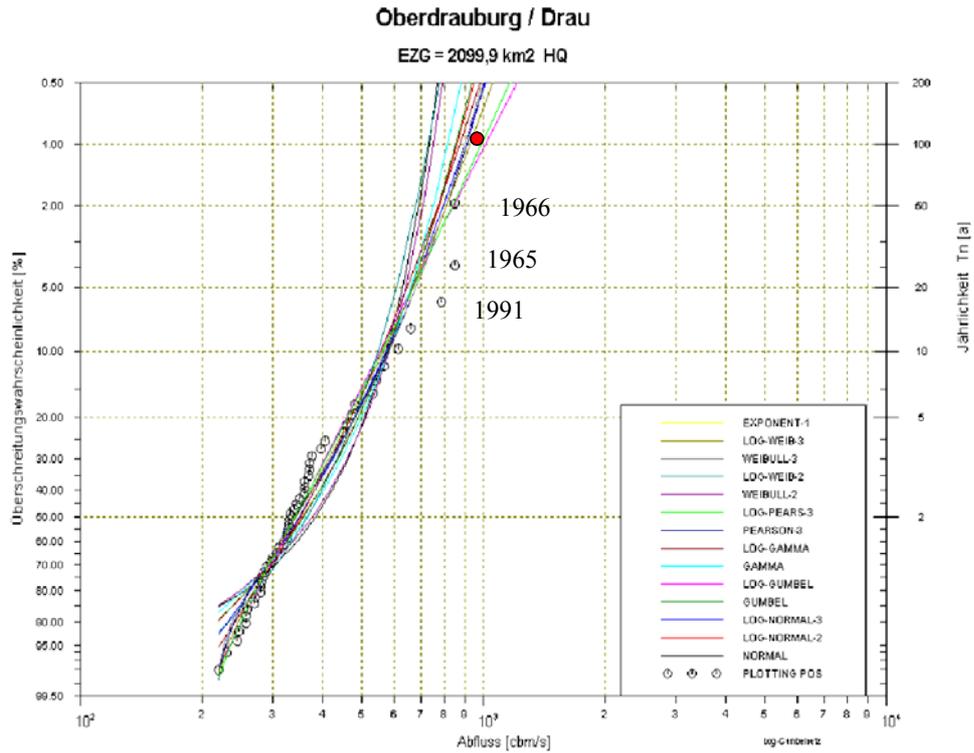
**Abb. 9:** Regionalisierte Mittelwasserspenden in Kärnten. (Kopeinig / Moser) Oben: Regionalisierung ohne Berücksichtigung der Topographie, Unten: Regionalisierung mit Berücksichtigung der Topographie.



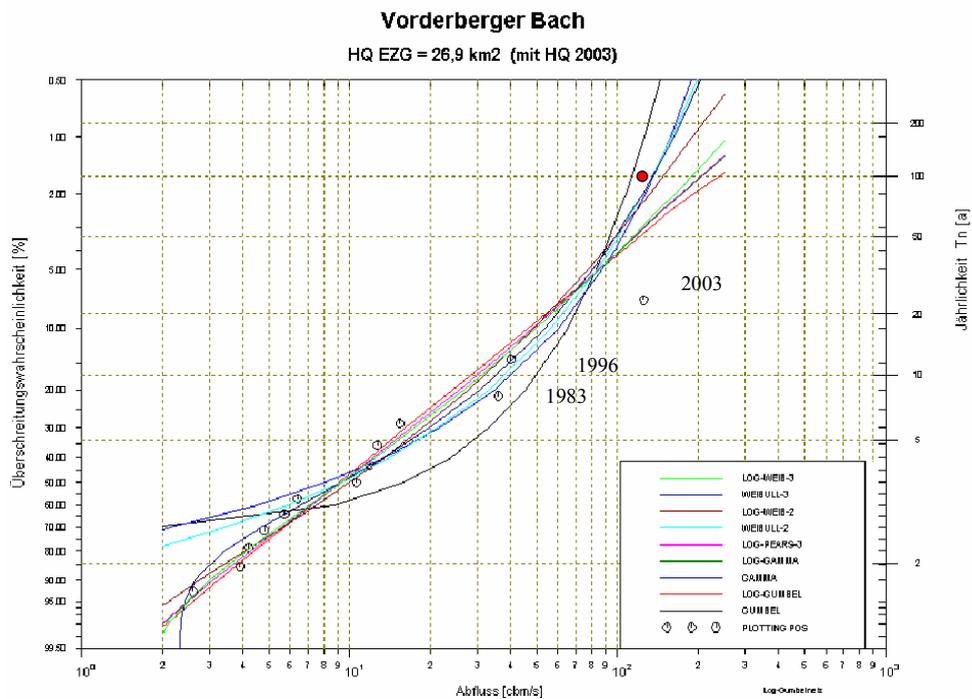
**Abb. 10:** Niederwasser Q95% Abflussspenden in Kärnten.

Zurück zur Abflussstatistik. Die statistischen Auswertungsergebnisse dienen zur ersten Orientierung bei der Festlegung der Bemessungshochwässer. Grundsätzlich ist die Festlegung des statistischen HQ100 nicht an eine bestimmte statistische Verteilungsfunktion (z.B. Gumbel) gebunden, sondern an jene, welche sich optisch/rechnerisch am besten an die empirischen Wahrscheinlichkeiten der gemessenen Hochwässer (plotting positions nach Weibull) anpasst. Diese optimale theoretische Verteilungsfunktion unterliegt einer gewissen Streuung, man spricht vom Konfidenzbereich. Die Verteilung nach Gumbel erscheint aufgrund ihrer stärkeren Krümmung (Hochwassermengen nehmen mit zunehmender Jährlichkeit nur mehr gering zu) geeignet zu sein, wenn große Retentionen vorliegen (Abb. 11). Bei Zubringern und Flüssen mit wenig Retention verlaufen die empirischen Wahrscheinlichkeiten (plotting positions) der beobachteten Hochwässer zumeist sehr gestreckt. Gumbel ist in diesem Fall nicht geeignete Wahl.

Sprechen die Beobachtungsdaten für die Gesamtheit? Die Beobachtungsdauern sind unterschiedlich. Das Abflussverhalten hat sich durch Regulierungen und Verlust von Retentionsräumen verändert. Hochwässer treten in Zyklen auf. Es gibt Perioden mit großen Hochwässern und Perioden mit weniger großen Hochwässern. In Kärnten war die letzte Periode mit großen Hochwässern an den Flüssen in den sechziger Jahren (1965 und 1966 gleich zweimal in einem Jahr). Nicht alle Pegel weisen repräsentative Hochwässer auf. Größte Hochwässer wurden z.T. nicht richtig erfasst (Umströmungen). Gelegentlich wurde anstatt des Hochwasserscheitelwertes lediglich der 7 Uhr Frühwert durch den Beobachter erfasst. Dies ist vor allem bei kurzzeitigen Hochwässern an Zubringern außerhalb der Tageszeit der Fall. Es hat früher zumeist nur Lattenpegel gegeben, die von den Beobachtern ein- bis dreimal im Tag abgelesen wurden. Von den Zubringern liegen nur wenige Daten vor. Hochwasserdaten der KELAG, AHP und WLV werden bei der Festlegung mit verwendet.



**Abb. 11:** Hochwasserstatistik für Pegel Oberdrauburg/Drau mit einer lange Zeitreihe (50 Jahre) und mehreren markanten Hochwässern. Die Analyse des Hochwasserverhaltens ergibt für  $HQ_{100}=1000\text{m}^3/\text{s}$ .



**Abb. 12:** Hochwasserstatistik für einen Zubringer (kurze Zeitreihe mit einem markanten Extremereignis, 22 Jahre, 13 beobachtete Werte),  $HQ_{100}$  wird zu  $120\text{m}^3/\text{s}$  bestimmt.

Die Zubringer verhalten sich zumeist auch anders als die Flüsse selbst, bei denen die Retention in den Pegeldaten mit einfließt (Abb. 12). Zubringer sind vordergründig von

konvektiven Ereignissen betroffen. Es herrschen völlig andere Niederschlags- (kurz und heftige Intensitäten) und Abflussprozesse vor, als bei Flüssen mit Ausuferungen und riesigen Retentionsflächen. So einfach sind daher die Pegelkennwerte (statistischen Parameter) von „Retentionspegeln“ nicht übertragbar auf Zubringer mit völlig anderem Abflussverhalten und Gefälle. Der Anteil an Geschiebe und Feststoffen (Treibholz) ist bei Wildbächen nur sehr schwer einschätzbar (Abb. 13).

Von den Zubringern liegen zumeist nur sehr kurze Zeitreihen vor, im Regelfall jedoch mit ein bis zwei markanten Hochwässern. Diese Ereignisse erscheinen aufgrund der Kurzzeitigkeit der Reihen, dann als sehr hoch. Vergleicht man jedoch gebietsmäßig die Zeitreihen verschiedener Pegel von Zubringern, so erkennt man, dass insgesamt diese Ereignisgrößen (Spenden) (Abb. 14) doch gemeinsame ähnliche Auftretswahrscheinlichkeiten bzw. Häufigkeiten des Auftretens haben. Man kann ihnen also eine bestimmte Auftretswahrscheinlichkeit aufgrund ihrer Größenordnung und Beobachtung in bestimmten Zeitabschnitten zuordnen. Ebenso bei Einzelereignissen, die in bestimmten Abschnitten im Gebiet beobachtet wurden.

Manche Pegel wurden bei der Erfassung von Hochwasser je nach Auswirkungen besser / schlechter betrieben (Abb. 15). Sehr gute Datenlage gibt es aufgrund der größeren Häufigkeit und Ausmaßes von Hochwässern von der oberen Drau, dem Mölltal, Liesertal und dem Gailtal. Mit weniger Augenmerk auf Hochwässer ist man zum Teil in Ost-Kärnten (Flussgebiet Gurk, Glan und Tiebel) und im Jauntal vorgegangen, denn viele Pegel erfassen die größeren Hochwässer nicht. Es besteht daher große Unsicherheit bei den Hochwasserdaten in diesen Bereichen.

All diese Aspekte sind bei der Festlegung des HQ100 - Bemessungshochwasser zu berücksichtigen (Abb. 16). Es soll ein Ansatz sein, der eine umfassende Beurteilung und Festlegung der Bemessungswerte für die einzelnen Regionen ermöglicht. Daher wird zusätzlich zur statistischen Auswertung die Spendenkurve und der Wundtfaktor (vereinfachte Regionalisierung) mit beurteilt. Diverse Gutachten, historische Hochwässer, die Betrachtung der mittleren jährlichen Hochwässer, Gebietsniederschlagsverhältnisse (Fronten und konvektive Ereignisse) und Wetterzugstraßen werden ebenfalls empirisch berücksichtigt. Bei den festgelegten HQ100 - Bemessungshochwässern (Abb. 16) ist je nach Datengrundlage (Statistik, Regionalisierung, Spendenkurve...) und zukünftige Hochwasserereignisse eine empirische Streuung zulässig. Es ist sinnvoll von einem plausiblen HQ100 – Bereich zu sprechen. Die Streubreite ist in Tabellen (Regel: + - 20 %, in Ausnahmen bis 30 %) angegeben.



Abb. 13: Vorderbergerbach im August, 2003, (HQ= 125 m<sup>3</sup>/s +- 20 m<sup>3</sup>/s, E = 26,9 km<sup>2</sup>)

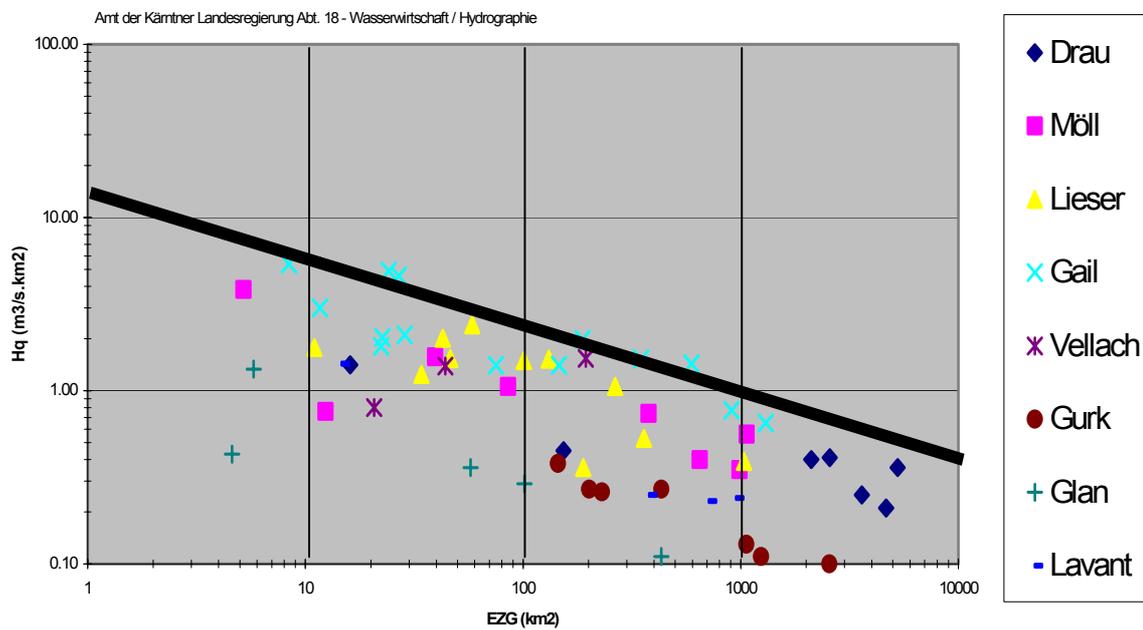


Abb. 14: Regional gemessene maximale Hochwasserspenden in Kärnten

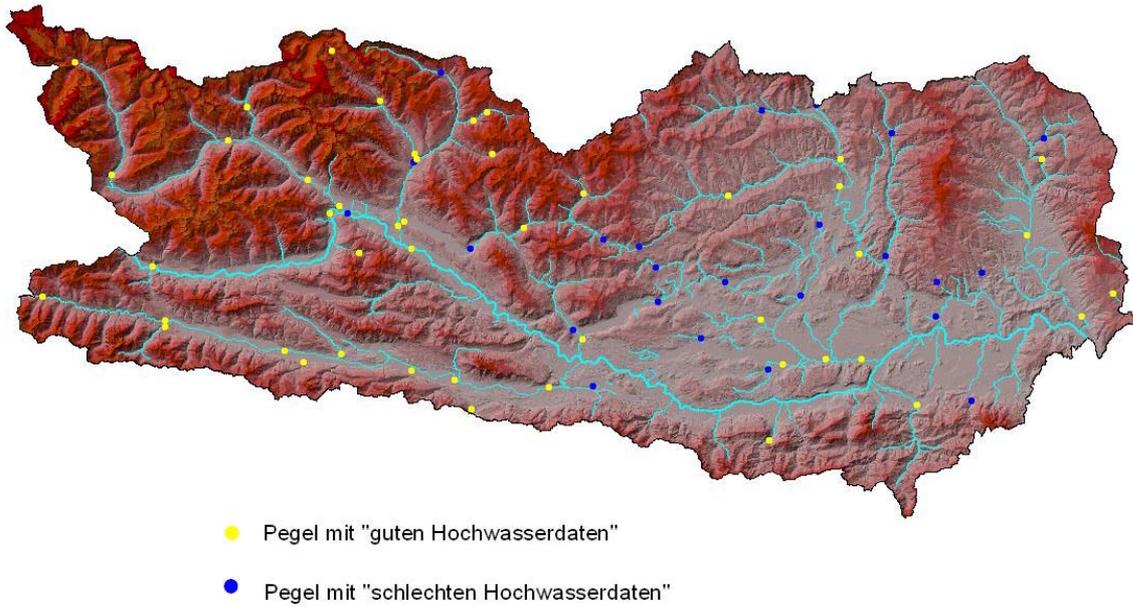


Abb. 15: Hochwassermeßnetz in Kärnten mit Einteilung der Pegel nach Qualität der Hochwasserbeobachtungen

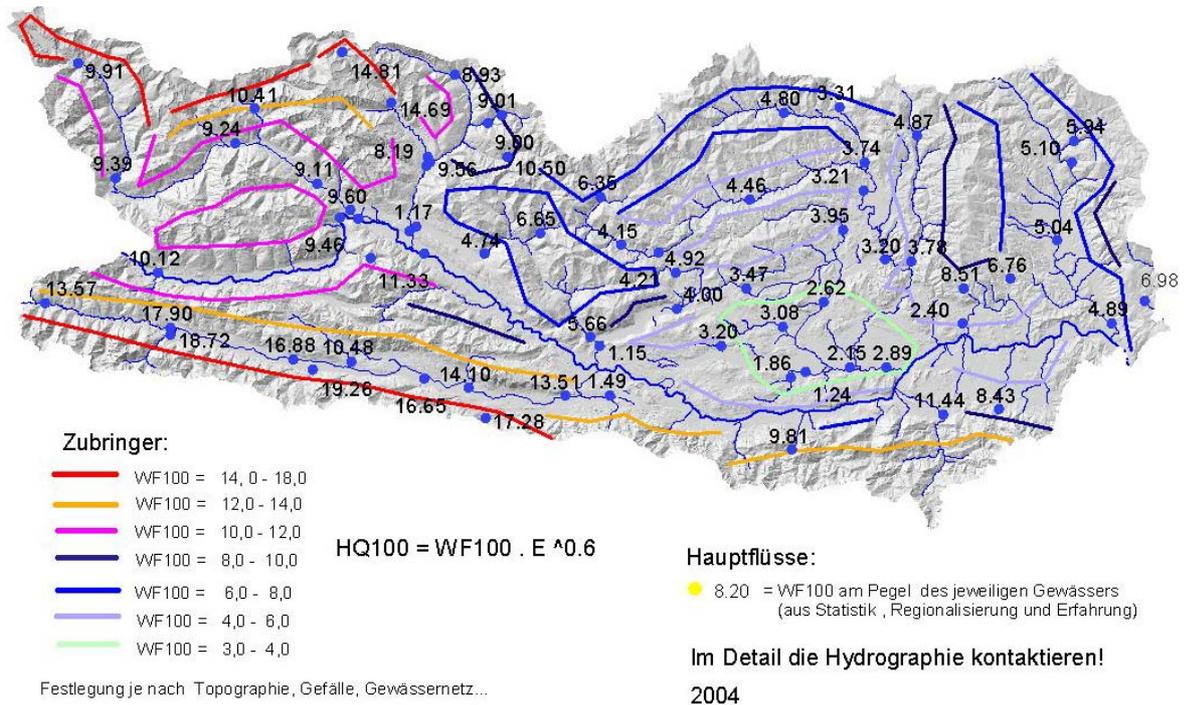


Abb. 16: HQ100 Bemessungskennwerte für Flüsse und Zubringer auf Basis statistischer Auswertungen, Spendenkurven und vereinfachter Regionalisierungsansätze (Moser)

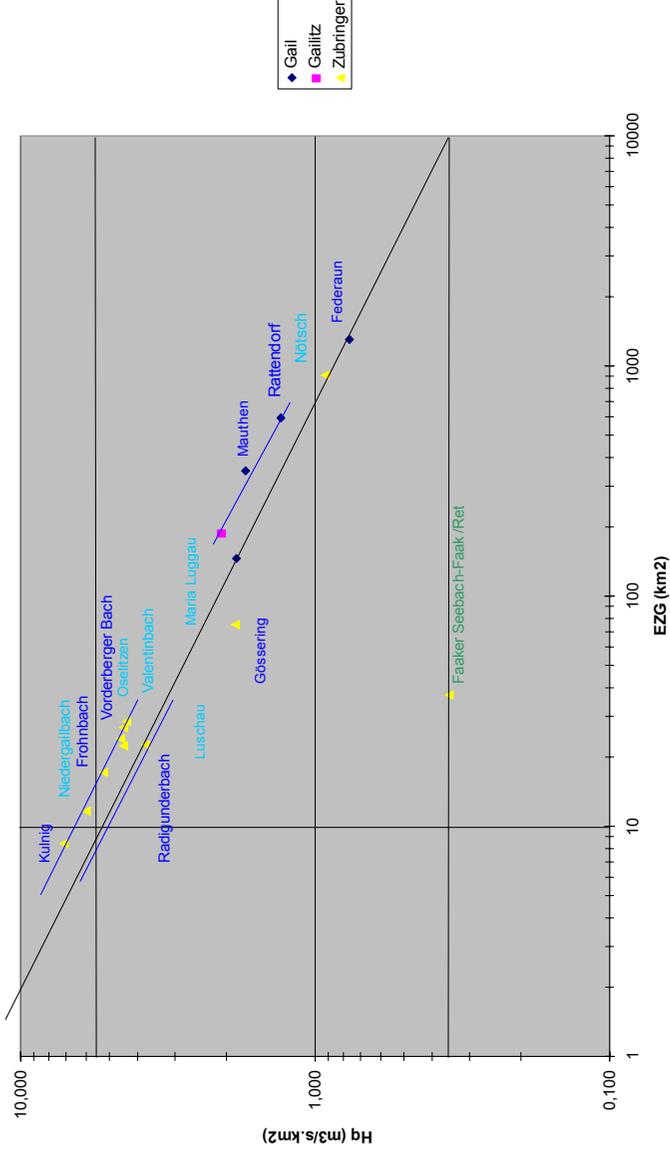


Abb. 17: HQ100-Hochwasserspenden, z.B. für das Flussgebiet der Gail.

Die festgelegten Bemessungsbereiche für die Zubringer dienen der ersten Grob-Orientierung (Gebietsorientierung). Detaillierte Regionalisierungsansätze in Abhängigkeit vom Einzugsgebietsgefälle, Gewässernetz, Einzugsgebietsgröße etc sind bei den großteils unbeobachteten Zubringern im Zuge der Gutachtenerstellung im Einzelfall vorgesehen. Zudem wird ebenfalls eine plausible Streuung des festgelegten Wertes angegeben.

Letztendlich gilt es, praktisch orientierte Bemessungswerte bzw. -bereiche festzulegen, die nahezu eine hundertjährige Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen, mit dem Hinweis, dass eine Streuung möglich ist, und auch noch größere Ereignisse jederzeit auftreten können und somit stets ein Restrisiko verbleibt, das in den diversen Gefahrenzonenplänen dargestellt werden sollte. Bei Bemessungen von Maßnahmen im Hochwasserabflussbereich sollten die festgelegten Werte bzw. der obere Streubereich angestrebt werden. Außergewöhnliche Feststofffrachten sind in den Werten nicht berücksichtigt und daher zusätzlich in Rechnung zu stellen.

Die Daten werden fortlaufend ergänzt, die Ergebnisse auf ihre Plausibilität überprüft und gegebenenfalls geändert. Auch hier gilt, dass die Daten eine Groborientierung darstellen und im Detail nicht die hydrologischen Einzelgutachten der Hydrographie ersetzen.

**Anschrift des Verfassers:**

Dipl.-Ing. Johannes Moser  
Amt der Kärntner Landesregierung  
Abteilung 18 / Wasserwirtschaft  
Unterabteilung 18 - Hydrographie  
Telefon: (+43 463) 536-31806  
E-Mail: [johannes.moser@ktn.gv.at](mailto:johannes.moser@ktn.gv.at)  
<http://www.wasser.ktn.gv.at>



## GELÄNDEANLEITUNG ZUR ABSCHÄTZUNG DES OBERFLÄCHENABFLUSSBEIWERTES BEI STARKREGEN - GRUNDZÜGE UND ERSTE ERFAHRUNGEN

Gerhard Markart, Bernhard Kohl, Bernadette Sotier, Thomas Schauer,  
Günther Bunza und Roland Stern

### Zusammenfassung

Für die Berechnung von Abflussganglinien in alpinen Einzugsgebieten ohne Direktmessung finden häufig einfache Ansätze (Laufzeitverfahren, Zeit-Flächendiagramm etc.) Verwendung. Die Qualität der mit diesen Verfahren erzielten Berechnungsergebnisse hängt i.d.R. weniger vom verwendeten Ansatz als von der Qualität der Inputparameter ab. Aus diesem Grund wurde am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen beim Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in intensiver Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) in München eine Anleitung zur Abschätzung von Abflussbeiwerten auf beitragenden Flächen bei Starkregen erarbeitet. Dieses Produkt basiert auf Ergebnissen langjähriger Feldmessungen - Starkregensimulationen und umfangreicher Begleituntersuchungen - in einer Vielzahl von Einzugsgebieten des Ostalpenraumes. Grundzüge der Anleitung und erste Erfahrungen werden in groben Zügen vorgestellt.

### Abkürzungen

AKI	Abflussbeiwertklasse
BFW	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
$C = \psi_{const}$	Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz
c	Wasserabflusskoeffizient, Rauigkeit
$i_N$	Intensität des Niederschlages [ $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ]
LfW	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
n	nass
N/A-Modell	Niederschlag-/Abflussmodell
RKL	Rauhigkeitsklasse
tr-mf	trocken bis mäßig frisch

## 1. Einleitung

Die Abflussberechnung in Einzugsgebieten ohne Direktmessung stellt nach wie vor eine besondere Herausforderung dar. So ist beispielsweise die mathematische Beschreibung der im Boden stattfindenden Abflussprozesse bei der Mehrzahl der modernen "am Markt" befindlichen N/A-Modelle ein nicht wirklich gelöstes Problem. In der Praxis kommen daher nach wie vor einfache Berechnungsansätze zur

Anwendung (Faustformeln, diverse Laufzeitansätze, Zeit-/Flächendiagramme etc.). Diese verlangen sehr oft Angaben über jenen Prozentsatz des Niederschlages, der mit geringer Verzögerung zum Abfluss kommt, also über den Abflussbeiwert.

Für die Ausscheidung beitragender Flächen und Abschätzung von Abflussbeiwerten in alpinen Einzugsgebieten waren lange Zeit nur unzureichende Grundlagen vorhanden. So finden sich in vielen Standardpublikationen, wie beispielsweise dem von Zeller (1974, 1981) vorgestellten Laufzeitverfahren tabellarische Angaben, die eine nur stark eingeschränkte Differenzierung der Einheiten nach ihrem Wasserverlust-Koeffizienten  $C$  erlauben. Zwar publizierten seit den 70er Jahren des 20. Jhdts. Mitarbeiter verschiedenster Institutionen in Mitteleuropa laufend Ergebnisse von Starkregensimulationen (Bunza, 1984, 1989; Bunza und Schauer, 1989, Bunza, et al. 1996, Johannes, 1995, Markart und Kohl, 1995, Markart et al., 1996, 1997, 2000; Schaffhauser, 1982, 1988; Scherrer, 1997, um nur einige zu nennen), es blieb jedoch weiterhin das Problem der Generalisierung und der Übertragbarkeit dieser Resultate auf andere Einzugsgebiete.

- Erste tabellarische Zusammenstellungen für einzelne Vegetations- und Nutzungseinheiten von Bunza und Schauer datieren aus dem Jahr 1989. Rickli und Forster (1997) präsentierten einen ersten Ansatz zur Abschätzung des Oberflächenabflusses bei Starkregen basierend auf einer Interpretation von Daten aus Starkregensimulationen und einer umfangreichen Literaturzusammenschau. Der Vergleich mit einigen Ergebnissen von Starkregensimulationen des BFW zeigte jedoch, dass mit diesem Ansatz der Abflussbeiwert bei Starkregen auf kritischen Flächen der Ostalpen nur unzureichend erfasst werden kann.
- In der umfangreichen Anleitung von Löhmannsröben et al. (2000) sind neben Beispielen zur Einschätzung des Oberflächenabflusses bei Starkregen die wichtigsten Faktoren, die zu erhöhtem Oberflächenabfluss bzw. erhöhter Abtragsbereitschaft in Wildbacheinzugsgebieten führen sehr gut beschrieben. Aufgrund der starken Betonung der Bodeneigenschaften und der Differenzierung der Abflussbeiwerte in maximal drei Abflussbeiwertklassen sind der Anwendung in der Praxis jedoch Grenzen gesetzt.
- Scherrer und Naef (2003) erarbeiteten einen fundierten Ansatz zur Abschätzung dominanter hydrologischer Abflussprozesse auf Graslandflächen. Die Anwendung der Anleitung setzt jedoch umfangreiches Fachwissen voraus, das Schema ist für Waldstandorte und intensiv genutzte Einheiten nur mit Einschränkungen anwendbar.

Aufbauend auf den Vorarbeiten der angeführten Autoren und einer Vielzahl von Felddaten aus Starkregensimulationen des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) und des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) wurde in intensiver Kooperation zwischen diesen beiden Institutionen eine "Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetations-

einheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0)" entwickelt (Markart et al., 2004). Diese Anleitung wird im Folgenden kurz vorgestellt, erste Erfahrungen nach Rückmeldungen aus der Praxis werden diskutiert. Die Autoren sind sich bewusst, dass es sich auch bei dieser Anleitung um ein Provisorium handelt, das stetiger Weiterentwicklung und Verbesserungen bedarf.

## 2. Randbedingungen

Die Anleitung baut im Wesentlichen auf den Resultaten von über 200 Starkregensimulationen des BFW und über 400 Berechnungen des LfW mit Großregenanlagen (Versuchsflächengrößen zwischen 50 und 100 m<sup>2</sup>) und Intensitäten zwischen 75 und 100 mm/h auf. Berechnungen von Kohl und Markart (2002), basierend auf Daten von 26 Testflächen, die mit verschiedenen Intensitäten (27 mm/h bis 120 mm/h) auf dem selben Standort beregnet wurden, zeigen, dass bei einer Zunahme der Intensität von 30 auf 100 mm/h nur mit einem Anstieg des Abflussbeiwertes  $\psi_{const}$  von 6% (bei  $\pm 9\%$  Standardabweichung) zu rechnen ist. Der Gültigkeitsbereich der Anleitung wird daher für Niederschlagsereignisse von 30 bis 120 mm/h ohne Zu- oder Abschläge in der jeweiligen Abflussbeiwertklasse angegeben.

Die Anleitung ist für die Abschätzung des potenziellen Oberflächenabflusses typischer alpiner Vegetations-/Bodeneinheiten bei Starkregen vorgesehen, und damit auf das realistische Worst-Case-Ereignis für das jeweils zu beurteilende Einzugsgebiet ausgerichtet. Der Anwender muss also vor Zuordnung der Abflussbeiwerte abklären, in welchem Systemzustand er die zu beurteilende Einheit zum aktuellen Zeitpunkt antrifft und wie der realistisch schlechte Systemzustand eigentlich aussehen könnte. So besteht z.B. die Gefahr, dass Feuchtflächen nach längerer Trockenphase zur Zuordnung wesentlich günstiger hydrologischer Eigenschaften verführen als bei voller Wassersättigung. Ebenso neigt man dazu, die Intensität der Beweidung und damit den Grad der mechanischen Beanspruchung von alpinen Rasen bei Beurteilung derartiger Standorte vor dem Almauftrieb zu unterschätzen.

## 3. Welche Parameter können mit der Anleitung abgeschätzt werden?

Mit der Geländeanleitung werden im Feld die Größen  $C$  (= Oberflächenabflussbeiwert  $\psi_{const}$ ) und  $c$  (=Wasserabflusskoeffizient, Rauigkeit) ermittelt. Diese Parameter können zur Parametrisierung einfacher N/A-Ansätze, beispielsweise über die Fließgeschwindigkeitsformel von Izzard (1946) herangezogen werden.

Die Anleitung dient zur quantitativen Abschätzung des Oberflächenabflusses aus beitragenden Flächen in Wildbacheinzugsgebieten. Der Abflussbeiwert  $\psi$  (Verhältnis Gesamtabfluss / Gesamtniederschlag) umfasst den Zeitraum der Initialabstraktion, daran anschließend die Phase des beginnenden Abflusses bis zur Abflusskonstanz, die Phase des konstanten Abflusses ( $\psi_{const}$ ) und den Nachlauf. Der Zeitraum bis zum Erreichen der Abflusskonstanz variiert in Abhängigkeit von der Initialabstraktion, also

der Summe aller Wasserverluste wie Interzeption, Evaporation, Transpiration, Wasserrückhalt in Bodenunebenheiten (Muldenspeicher), Versickerung und unterirdischem Abfluss. Während also die Initialabstraktion maßgeblich vom Systemzustand beeinflusst wird, hängt die Steilheit des Abflussanstieges maßgeblich von der Rauigkeit der Oberfläche (Deckung der Vegetation, Anteil an toter Biomasse etc.) ab.

Daher wird mit der Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ( $\psi_{const}$ ) angeschätzt, dieser ist in deutlich geringerem Umfang vom Systemzustand abhängig, wie bisher noch nicht veröffentlichte Auswertungen von Kohl zeigen.

## **4. Aufbau der Anleitung**

### **4.1 Die hydrologische Vegetationsform (Spalte 1 in Tab.1)**

Aus dem zur Verfügung stehenden Datenpool ließen sich Beurteilungskriterien für die folgenden, im Ostalpenraum vorkommenden hydrologischen Einheiten entwerfen:

#### Zwergstrauchheiden

- Alpenrosen- und Heidelbeerheide
- Besenheide
- Besenheide/Erika + Wacholder
- Latsche (auch mit Zwergsträuchern und einzelnen Bäumen)

#### Mähwiesen und Rasen

- Mähwiesen
- Rasen (nicht Bürstling)
- Bürstling-Rasen (Borstgras-Rasen)
- Feuchtwiesen und Niedermoore

#### Rohböden und Planien

- Vegetationslos bzw. initiale Stadien einer Vegetationsbildung
- Planien, Begrünungen

#### Wälder

- Nadelwälder
  - Fichte (beigemischt auch andere Nadelhölzer, mit und ohne Krautschicht)
  - Lärche
  - Zirbe / Fichte mit Zwergstrauchunterwuchs
- Laubmischwälder (beigemischt auch Nadelbaumarten)

#### Hochstaudenfluren

#### Grünerlengebüsch

Im Gelände wählt man die entsprechende Vegetationsform aus, und ordnet über die Indikatoren des Abflussverhaltens (Spalten 2-4 in Tab.1) die entsprechende Abflussbeiwertklasse zu (Spalten 5 und 6 in Tab.1).

In den langjährigen Felderhebungen ließen sich drei Indikatorgruppen für die Beurteilung der Bereitschaft eines Standortes zur Bildung von Oberflächenabfluss eingrenzen:

- Bodeneigenschaften
- Art und Intensität der Landnutzung, standörtliche Besonderheiten
- Pflanzen als Standortsindikator

Die Abfolge dieser Größen gibt keine Reihung in Bezug auf ihre Abfluss fördernde oder mindernde Wirkung wieder. Ihre Aussagekraft ist auch nicht überall einheitlich. Auf Standorten, die nur in geringem Maße anthropogenen Einflüssen unterliegen, z.B. extensiv oder kaum bewirtschaftete Wälder in entlegenen Regionen, treten Nutzungsindikatoren in den Hintergrund. An Feuchtstandorten weist die Vegetation auch in Phasen der Austrocknung eindeutig darauf hin, dass es sich hier um Standorte mit hohem Abflusspotential handelt, die Vegetation ist auf solchen Standorten der dominante Indikator (auch für die Anschätzung des tatsächlichen räumlichen Ausmaßes derartiger Flächen).

Tab. 1: Schema für die Zuordnung der Abflussbeiwertklasse

Vegetations- einheit	Boden	Nutzung Besonderheiten	Zeigerwerte Feuchte	Abfluss- beiwertklasse	Abfluss in % von N	Zeilen
hydrologische Vegetationsform (Zwergstrauchheide, Wald, Rasen...)	Grob- Boden, locker	keine Nutzung / Belastung, keine Vernässung, kein Kleingerinnenetz	tr-mf	<b>0</b>	0	1
	■■■■■ ↓	■■■■■ ↓	■■■■■ ↓	<b>1</b>	1-10	2
				<b>2</b>	11-30	3
				<b>3</b>	31-50	4
				<b>4</b>	51-75	5
	Fein-Boden, bindig, dicht	intensive Belastung, Intensivweide, Häufung von Tiefenlinien...	n	<b>5</b>	76-99	6
	dicht	offene Wasser- fläche, Asphalt, Beton etc.	n	<b>6</b>	100	7
Spalten	1	2	3	4	5	6

**Tab. 2:** Grobeinteilung der Böden nach ihrem Infiltrationsverhalten (aus Markart et al., 2004)

Pos.	Boden	Beschreibung	Beschreibung
1	Grob-Böden locker	Skelettreiche, grobkörnige Böden mit hohem Grobanteil (Kies, Sand) <b>Wasserdurchlässigkeit sehr hoch</b>	
2	Grob-Böden mit Feinanteil locker	Skelettreiche, grobkörnige bis gemischtkörnige Böden mit hohem Grobanteil (Kies, Sand), wobei maximal bis zu 20% Ton- und Feinschluff enthalten sein können. <b>Wasserdurchlässigkeit hoch-mittel</b>	
3	Fein-Böden locker	Gemischt- bis feinkörnige Böden mit Schluff- und Tonanteilen bis 40%. <b>Wasserdurchlässigkeit hoch- mittel</b>	
4	Fein-Böden bindig	Diese gemischt- bis feinkörnigen Böden enthalten höhere Schluff- und Tonanteile (> 40%), sie verhalten sich bindig (plastisch). Der vorhandene Grobanteil wird nur in Trockenphasen (Schwundrisse) hydrologisch wirksam. Die <b>Wasserdurchlässigkeit ist mittl- gering</b> , das Wasserbindevermögen deutlich bis hoch. Die plastischen Eigenschaften ändern sich mit dem Wassergehalt.	
5	Fein-Böden verdichtet, dicht	Das <b>Infiltrationsverhalten</b> von Grob-Böden mit Feinanteil bzw. Fein-Böden ist durch mechanische Belastung (Befahren, Planie, Weide) weiter <b>reduziert</b> . In diese Kategorie sind z.B. ehemals lockere, aber durch Planie verdichtete Feinböden einzuordnen.	

#### **4.2 Bodeneigenschaften (siehe Spalte 2 in Tab.1, Tab.2)**

Die Infiltrationseigenschaften des Bodens werden häufig durch Art und Intensität der Bewirtschaftung und die Vegetation überprägt. Dennoch bestimmen die Bodenverhältnisse das Abflussgeschehen z.B. über die Korngrößenverteilung, Dränporenausstattung, Leitfähigkeit, etc. maßgeblich mit. Aufgrund der limitierten Zeit, die den Praktikern i.d.R. für die Gebietscharakterisierung zur Verfügung steht, fließen in die Beurteilung nur minimale Bodeninformationen, wie sie in der Natur an vorhandenen Aufschlüssen (Wegböschungen, Erosionsstellen...) einfach beurteilt werden können, ein. Der Anwender kann den Standort im Rahmen der in Tab.2 angeführten Bandbreiten einer von 5 Positionen zuordnen.

Die 5-stufige Einteilung der Böden, vom lockeren Grob-Boden bis zum bindigen / dichten Fein-Boden, basiert auf den im Feld relativ einfach abschätzbaren Kenngrößen Grob-/Feinanteil und Lagerung. Sie wurde aus Feldbeobachtungen und American Society for Testing Materials (1966), DIN 18196 (1988), Schriftleitner und Smolczyk (1990), sowie Prinz (1991) abgeleitet.

#### **4.3 Nutzung und Besonderheiten (Spalte 3 in Tab.1)**

Im Folgenden wird kurz auf einige Nutzungs- und Standortscharakteristika eingegangen, welche das Abflussverhalten stark beeinflussen. Detailliertere Ausführungen finden sich bei Markart et al. (2004):

- Viele der anthropogenen Nutzungseingriffe (Planieren, Befahren, Weide - Vertritt, sonstige Bodenverwundungen bei der Ernte, etc.) führen zu einer mechanischen Belastung des Bodens und wirken sich i.d.R. negativ auf die Infiltrationsleistung der alpinen Böden bei Starkregen aus (Bunza und Schauer 1989, Markart et al. 1999, 2000; Markart und Kohl 2004, Schauer 1988, Schreiber 1997). Daher enthält die Anleitung eine Bewertung der Auswirkungen verschiedenster Eingriffe auf das Abflussverhalten und Hinweise für die Beurteilung der Weideintensität im Feld.
- Bei Zuordnung des Abflussbeiwertes ist der Deckungsgrad der Vegetation in besonderem Maße zu berücksichtigen. Insbesondere gilt dies für eine nutzungsbedingte örtliche und zeitliche Reduktion des Deckungsgrades, z.B. durch Weidegang oder Planie.
- Die bisher vorliegenden Ergebnisse von Starkregensimulationen des LfW und des BFW zeigen keinen direkten Zusammenhang zwischen Hangneigung und Abflussmenge bei Starkregen. Der Einfluss der Hangneigung auf den Oberflächenabfluss wird vielfach durch Kombinationen anderer Faktoren überlagert (Reduktion der Fließgeschwindigkeit durch die Vegetation, das Mikorelief). Mit abnehmendem Deckungsgrad der Vegetation nimmt der Effekt der Hangneigung zu. Der kritische Wert der Vegetationsbedeckung liegt nach Morgan (2004) bei 70%. Für die Hochlagen ist dieser Wert noch höher - mit 80% - anzusetzen. Der Oberflächenabfluss an steilen, nur teilweise vegetationsbedeckten oder offenen Hängen ist mit hohem Feststoffabtrag

kombiniert, und zeigt besonders auf Lockersedimenten eine hohe Bereitschaft zur Auslösung von Hangrutschen (vgl. Markart et al. 2000, Kohl et al. 2002).

- Der Anteil des oberflächennahen Zwischenabflusses im Boden nimmt mit steigender Bioturbation (z.B. starke Wühltätigkeit von Mäusen, Maulwürfen etc.) zu, und damit auch die Wahrscheinlichkeit für einen Wiederaustritt bereits versickerten Wassers, z.B. an Hangkanten.
- Die Abflussbereitschaft ist saisonalen Änderungen unterworfen (Kohl und Markart 2002). Das Pflanzenwachstum lässt im Hochsommer nach, der Anteil an benetzungshemmender toter Substanz in der Auflage und in der obersten Bodenkrume nimmt zu. Zudem nimmt durch Weidegang die Bodenbedeckung ab. Pflanzen wie der Bürstling (Borstgras, *Nardus stricta*) reichern tote Blattmasse an, diese Bestandesabfälle sind schwer zersetzbar und wirken wie ein Strohdach (Markart et al. 1996, 2000).
- Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ( $\psi_{const}$ ) variiert bei gleicher Vorbefeuchtung nur in geringem Maße, wie die Ergebnisse von Kohl und Markart (2003) deutlich zeigen. Hohe Vorbefeuchtung äußert sich in einer deutlichen Verkürzung der Anlaufzeit. Dies belegen Auswertungen von Starkregensimulationen bei denen die Bodenfeuchte an mehreren Profilen in verschiedenen Tiefen gemessen wurde (Markart und Kohl, 2004).
- Die Gerinnenetzdichte ist Ausdruck der geologischen Verhältnisse. So sind beispielsweise Böden aus der Mergelverwitterung oder aus ähnlichen Gesteinen (Phyllite, Glimmerschiefer etc.) Wasser stauend und erodieren sehr leicht, der Oberflächenabfluss geht sehr rasch in Rinnenerosion über.
- Oft geben bereits die Geländeformen deutliche Hinweise auf das Abflussverhalten eines Standortes. Kleingerinne und Gräben häufen sich in bzw. unter stark geneigten Hängen mit glatter Oberfläche, aber auch auf Flächen mit starkem Hangwasserzug, Feuchtflächen und Moorkomplexen. Auf solchen Standorten sind meist sehr hohe Abflusspenden zu erwarten (AKI 5, 6).

#### **4.4 Indikatorfunktion der Vegetation, Feuchte-Zeigerwerte (Spalte 4 in Tab.1)**

Vegetationseinheiten und -formen sind wichtige Indikatoren für die Standortsgegebenheiten, insbesondere die vorherrschenden Feuchteverhältnisse, und ermöglichen damit Rückschlüsse auf die Abflussbereitschaft (Schauer, 1992, Kohl, 2000). Die Kenntnis gehäuft vorkommender Pflanzen stellt daher ein wichtiges Mittel zur Charakterisierung des Abflussverhaltens eines Standortes dar.

Eine Reihe von Autoren hat sich mit den Zeigerfunktionen der Pflanzen auseinandergesetzt, z.B. Ellenberg (1986), Ellenberg et al. (1991) oder Landolt (1977) und diesen Zeigerwerte zugeordnet, z.B. für die von ihnen angezeigte Standortsfeuchte. Diese Skalen sind jedoch für die direkte Anwendung in der Praxis (Zuordnung eines Abflussbeiwertes) zu eng gefasst. Darauf weisen auch die

Ergebnisse der nach vegetationskundlichen Kriterien ausgewerteten Starkregensimulationen des LfW hin. Sie ließen beispielsweise keine signifikanten Unterschiede für die Feuchtestufen **tr** (trocken) bis **mf** (mäßig frisch) erkennen. Für die Praxis wurden die verschiedenen Skalen der angeführten Autoren daher zusammengeführt und auf maximal 4 Klassen gestrafft.

## 5. Beispiel für die Abflussbeiwertschätzung

Als Beispiel für die Anwendung der Geländeanleitung soll ein dichter Bürstlingrasen mit folgenden Charakteristika fungieren (Tab.3):

- Feinteilreicher Untergrund
- extensiv bestoßen
- einzelne Feuchtezeiger

Bürstlingrasen sind im Gelände i.d.R. recht gut erkennbar, sie sind in Bezug auf ihr Abflussverhalten besonders kritisch zu beurteilen. In der Anleitung wird daher die hydrologische Vegetationsform Bürstling (Spalte 1) ausgewählt. Der Bürstling (*Nardus stricta*) akkumuliert tote Biomasse (Blattscheiden, Streu) und bildet einen dichten Wurzelfilz aus. Der auftreffende Niederschlag wird auf dieser Auflage wie auf einem Strohdach abgeleitet. Eventuell vorhandene positive hydrologische Eigenschaften des Mineralbodens werden überlagert. Daher ist die Abflussbereitschaft dieser Einheiten i.d.R. hoch, die Abflussbeiwertklassen 1 und 2 kommen nicht vor.

Über Spalte 2 (Boden) Fein-Boden - dessen Eigenschaften im gegenständlichen Fall von untergeordneter Bedeutung sind - geht der Anwender zur 3. Spalte (beweidet / extensiviert). Das Vorhandensein einzelner Feuchtezeiger, wie Juncus-Arten (Binsen), deutet darauf hin, dass die ersten beiden Zeilen nicht In Frage kommen. Auch Zeile 4 fällt aus (Grob-Boden). Der Anwender kommt daher bei Zugrundelegung der oben angeführten Charakteristika des Standortes in der dritten Zeile über die grau unterlegten Zellen von Spalten 2 bis 4 zur AKI 5.

**Tab. 3:** Der Weg zur Oberflächenabflussbeiwertklasse - Zuordnung für die hydrologische Einheit Bürstlingrasen, extensiv beweidet.

Vegetations- einheit	Boden	Nutzung Besonderheiten	Zeigerwerte Feuchte	Abfluss- beiwertklasse	Zeilen
<b>Bürstling-Rasen</b>	<b>Grob-Boden</b> , locker, teilw. anstehendes Grobskelett mit offenen Klüften	weidefrei	mf-f	<b>3</b>	1
	<b>Fein-Boden</b> , dicht (Wurzelfilz)	beweidet oder unbeweidet, Zwergstrauchanteil bis 25%		<b>4</b>	2
		beweidet / extensiviert	mf-ff	<b>5</b>	3
	<b>Fels suban- stehend</b> , sehr flachgründig	Rasen wechselt mit freiem Fels oder dichtem offenem Schutt, starke Rinnenbildung, i.d.R. steil, keine bis wenig Zwergstrauchheide		mf-f	<b>5</b>
Spalten	1	2	3	4	5

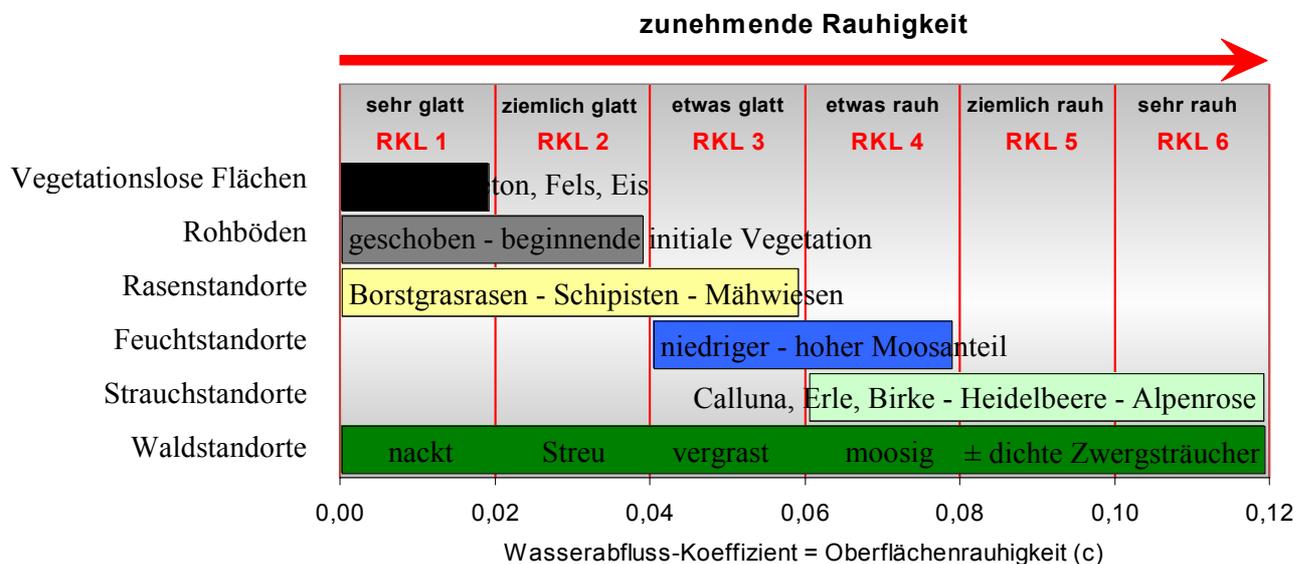
## 6. Abschätzung der Rauhigkeit

Ähnlich wie bei der Beurteilung des Abflussbeiwertes wird auch bei der Abschätzung der Rauhigkeit von einer sehr groben Einteilung nach den wichtigsten Oberflächenbedeckungstypen ausgegangen. Die effektive Klassifizierung der Rauhigkeit richtet sich nach Art und Qualität des Bewuchses bzw. der Bodendeckung. Die Rauhigkeit wird vereinfachend für die Dauer eines Niederschlagsereignisses als konstant angesehen, d.h. sich während des Niederschlagsereignisses ändernde Größen - wie z.B. verringerte Rauhigkeit durch Hagelschlag, mit zunehmender Ereignisdauer abnehmende hydrophobe Wirkung organischer Substanzen, etc. werden hier nicht berücksichtigt.

Aus Abb.1 können Rauhigkeitsklassen für verschiedene Oberflächen- und Vegetationstypen abgeleitet werden:

- Für Asphalt, Beton, Fels, Eis sollte das Mittel der RKL 1 (0,01) nicht unterschritten werden, da sonst rechnerisch unrealistisch hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten können.
- Bei Rohböden und offenen Brachflächen stellt der Sukzessionsgrad - der Deckungsgrad der sich ansiedelnden Pflanzen - ein gutes Zuordnungsmerkmal dar. Vereinfacht kann man Standorte mit einem Deckungsgrad über 10% der Rauhigkeitsklasse 2 (ziemlich glatt) zuordnen.

- Rasenstandorte decken ein weites Spektrum der Rauhmigkeit ab. Entgegen weit verbreiteter Literaturangaben fällt eine Reihe der am BFW berechneten Rasenstandorte, speziell die Bürstling- oder Borstgras-Rasen (*Nardus stricta*) in RKL 1 (sehr glatt). Intensive Betreuung und Pflege von Rasenflächen (Begrünung, Düngung, Vermeidung von mechanischer Belastung, Mahd mit leichtem Gerät, Liegenlassen des gemähten Grases zur Mulchung) erhöhen die Rauhmigkeit (bis RKL 3).
- Viele Feuchtflächen weisen i.d.R. bedingt durch ihren hohen Moosanteil eine höhere Rauhmigkeit auf (etwas rau, RKL 4). Die Fließgeschwindigkeiten sind auf diesen Flächen meist niedriger als auf anderen Rasenstandorten.



**Abb. 1:** Rauhmigkeitsklassifizierung nach unterschiedlichen Vegetations- bzw. Bodenbedeckungstypen

Bei Zwergstrauchbeständen ist die Rauhmigkeit, abhängig von der dominierenden Zwergstrauchgesellschaft, meist hoch. Lediglich die häufig mit Borstgras vergesellschaftete Besenheide ist noch den "etwas glatten" Standorten (RKL 3) zuzuordnen.

Nachdem der Niederschlag die Baumkronen durchdrungen und dabei an kinetischer Energie verloren hat, werden die Menge des Oberflächenabflusses und dessen Geschwindigkeit primär von der Rauhmigkeit des Waldbodens und seiner Oberfläche bestimmt (Bodenvegetation, Humusaufgabe, Formenretention). Je nach Unterwuchs variiert die Rauhmigkeit von Waldböden daher zwischen sehr glatt (z.B. *Piceetum nudum*) bis sehr rau, und ist nach der vorhandenen Bodenvegetation und dem Mikrorelief (glatte Oberfläche - Abfluss fördernd, viele kleine Mulden - Abfluss verzögernd) analog den vorhergehend beschriebenen Bewuchsformen zu beurteilen.

## 7. Weitere Hilfsmittel

### 7.1 Bebilderte Beispiele für die Anschätzung von Abflussbeiwerten und Rauzigkeit

In Ergänzung zu den in Kapitel 4 bis 6 vorgestellten Beurteilungsschemata umfasst die Anleitung auch eine Reihe von Abbildungen und Beurteilungen von Vegetations- und Nutzungsformen, wie sie von den Autoren in Wildbacheinzugsgebieten des Ostalpenraumes häufig gefunden wurden (siehe Beispiel in Abb.2)



Gesellschaft	Standort Boden	Nutzung	Hydrologische Eigenschaften, Zeiger	Rauigkeits- klasse	Abfluss- beiwertklasse
Bürstling-Rasen vergesellschaftet mit anderen Gräsern bzw. Zwergsträuchern (deren Anteil < 50%)	Grob-Boden mit Feinanteil, auch Fein- Boden (dicht durch Wurzelfilz im Oberboden)	keine / Weide	<b>mf-ff</b> , aufgrund des Strohdacheffektes und Wurzelfilzes des Bürstlings trotz möglicher guter Leitfähigkeit des Mineralbodens hoher Oberflächenabfluss.	<b>1-2</b>	<b>4</b>
Bürstling-Rasen (rein)				<b>1</b>	<b>5</b>

**Abb. 2:** Subalpiner Bürstlingrasen mit Beurteilungsschema. Für die Vegetationsform laut Abbildung gilt die untere Zeile (Bürstling-Rasen rein), also Abflussbeiwertklasse 5 ( $\psi_{const} > 0,75$ ). Die niedrige Rauigkeitsklasse 1 bedeutet eine sehr glatte Oberfläche, daher rasche Bildung von Oberflächenabfluss und hohe Fließgeschwindigkeit.

## 7.2 Beispiele für Zeigerpflanzen

Die im Anhang zur Anleitung angeführten Zeigerpflanzen ermöglichen die Ansprache eines durchschnittlichen hydrologischen Zeigerwertes (im Jahresmittel) bzw. die Charakterisierung des Bodenwasserhaushaltes und basieren auf Felderfahrungen. Die Zuordnung von Abflussbeiwerten anhand singularer auftretender Pflanzen ist nicht sinnvoll. So ist z.B. der Abflussbeiwert von Standorten auf denen *Caltha palustris* (Sumpfdotterblume) nur vereinzelt vorkommt, in der Regel etwas niedriger als auf Standorten, auf denen diese Art flächendeckend vorkommt. Beispiele für typische Zeigerpflanzen sind in Abb.3 angeführt.

Als stark vereinfachte Faustregel kann gelten:

- Einzelne Feuchtezeiger AKI 3 bis niedrige AKI 4
- Häufung von Feuchtezeigern mittlere bis hohe AKI 4
- Nässe- und Feuchtezeiger AKI 5
- Hoher Deckungsgrad der Nässezeiger AKI 6



Gemeiner Sauerklee ( <i>Oxalis acetosella</i> )		gemeine Pestwurz ( <i>Petasites albus</i> )		Sumpfdotterblume ( <i>Caltha palustris</i> )	
Standort	AKI	Standort	AKI	Standort	AKI
krautreiche Nadel(misch)Wälder, Hochstaudenfluren, Zwergstrauchgesell- schaften	<b>1-2</b>	Feuchte Wälder	<b>3-4</b>	nasse Wiesen und Wälder	<b>5</b>

Abb. 3: Beispiele für Pflanzen mit Abfluss-Zeigerfunktion

## 8. Bezug der Anleitung

Die Anleitung kann über die Bibliothek des BFW in gebundener Form unter folgender Web-Adresse bestellt werden: <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=4009>. Auch direkter Download über die gleiche Adresse (7 pdf-Dateien) ist möglich.

## 9. Erste Erfahrungen und Reaktionen aus der Praxis

Bereits im Zuge der Erarbeitung der Anleitung wurde das System in Abstimmung und Zusammenarbeit mit zukünftigen Anwendern an einer Reihe von Testgebieten erprobt. Dabei zeigte sich:

- Die Ausscheidung von eindeutigen Flächen, wie Standorten ohne Oberflächenabfluss (dichte alpine Zwergstrauchheide auf durchlässigem Untergrund, grober Hangschutt, etc.) oder Einheiten mit sehr hohem Abflusspotential (vollkommen versiegelte Flächen, offene Wasserflächen) ist ohne großen Aufwand möglich.
- Flächen mit niedrigem bis mittlerem Abflusspotential lassen sich leichter voneinander abgrenzen, daher wurde auch die Einteilung der AKI 1-3 enger gestaffelt als jene der AKI 4 und 5 mit hoher Abflussbereitschaft.

Erste Rückmeldungen zeigen, dass Anwender, die über eine profunde Gebietskenntnis oder / und viel Felderfahrung und damit über entsprechendes Basiswissen in der Beurteilung von Boden, Vegetation, Landnutzung bzw. Landformen verfügen, in der Handhabung der Anleitung und mit der Zuordnung der Abflussbeiwerte leichter zurecht kommen.

Die Zuordnung eines Abflussbeiwertes anhand nur einer Merkmalgruppe, z.B. nur unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften (Spalte 2 in Tab.3), funktioniert nur in einzelnen Fällen, z.B. bei Skelettböden oder sehr lockeren Böden ohne Oberflächenverdichtung. I.d.R. werden Angaben aus mindestens einer weiteren Gruppe für eine einigermaßen sichere Einordnung benötigt (Spalten 3 und 4 in Tab.3).

Die Anleitung ist für die Anwendung in der Praxis konzipiert, daher wurde die Liste der bodenkundlichen Merkmale bzw. Differenzierungsmöglichkeiten auf 5 Positionen beschränkt (siehe Tab.2).

Wiederholte Anfragen betrafen die Erweiterung der bodenkundlichen Einteilung und Möglichkeiten der direkten Attributierung dieser Klassen mit Infiltrations- bzw. Abflusskennwerten, auch um diese direkt als Eingangsgrößen für Modellrechnungen zu verwenden.

Diesen Vorstellungen kann und soll die Anleitung aus mehreren Gründen nicht entsprechen:

- Eine Reihe von Berechnungsverfahren basiert darauf, dass "typischen" Böden aufgrund lokal erhobener physikalischer Kennwerte ein bestimmtes Retentionsvermögen unterstellt wird, wie z.B. beim Laufzeitverfahren nach Kölla (1986), dem modifizierten Laufzeitverfahren nach Barben et al. (2002),

dem modifizierten CLARK-Verfahren (Vogt und Forster 1999, Vogt 2001) oder dem Verfahren des US-Soil-Conservation-Service (SCS 1985). Bei der gegenständlichen Geländeanleitung wurde bewusst von anderen Voraussetzungen ausgegangen, denn für die Entwicklung und seriöse Anwendung der aufgezählten Verfahren fehlt es in Österreich an systematisch erhobenen bodenphysikalischen Kennwerten.

- Aus den Arbeiten von Kohl (2002), Markart und Kohl (1993, 1995), Markart (2002), Zanetti (1996) geht deutlich hervor, dass die physikalischen Eigenschaften alpiner Böden auf kleinstem Raum häufig in extremem Maße variieren, und damit die Übertragbarkeit lokal erhobener Bodenkennwerte auf größere Bereiche limitiert ist.
- Vegetation, Art und Intensität der Landnutzung überprägen die physikalischen Eigenschaften der Böden in starkem Maße (Bunza und Schauer 1989, Schauer 1992). D.h. gerade in den Hochlagen werden mit der Beschreibung einzelner Profile oder Bohrstockproben die tatsächlichen Standortsverhältnisse meist nicht ausreichend genau erfasst.
- Die Anzahl der "Bodenklassen" wurde bewusst auf 5 Positionen limitiert, um eine Handhabung der Anleitung durch den Praktiker mit ausreichender Genauigkeit zu ermöglichen. Bei stärkerer Fokussierung auf bodenkundliche Unterscheidungsmerkmale - bei mäßigem Gewinn an Aussagekraft - wäre wesentlich mehr bodenkundliches Basiswissen notwendig, auch würde damit der Benutzerkreis unnötig eingengt.

Die bisherigen Auswertungen der Starkregensimulationen zeigen, dass Pflanzen sehr effiziente Weiser für das Abflussverhalten sind. Es war daher angedacht, die Zeigerfunktion der Pflanzen intensiver zu erforschen und die Berechnungsdaten gezielt nach Pflanzenindikatoren auszuwerten. Mit der Kenntnis von ca. 100-150 Abflusszeigerpflanzen könnten Praktiker weite Bereiche des Ostalpenraumes ausreichend hydrologisch charakterisieren. Das Feedback aus der Praxis zeigt aber, dass hier viel mehr auf Gesellschafts- und Assoziationsebene gedacht wird, die Bereitschaft zum Erwerb der botanischen Kenntnisse eher gering ist und anderen Indikatoren, wie z.B. der Beurteilung von geomorphologischen Hinweisen oder Nutzungsaspekten eher der Vorrang eingeräumt wird.

Das Gros der Datengrundlagen stammt aus dem Ostalpenraum, höhenzonal primär reichend von den Mittelgebirgen bis in die Hochlagen über die Waldgrenze (höchstgelegener Berechnungsstandort: 2500 m über NN). Silikatstandorte sind deutlich stärker repräsentiert als Einheiten auf karbonatischer Grundlage. Die Datengrundlage wird nach N und E ab dem österreichischen Alpenvorland schlechter, aus der Böhmisches Masse (Ober- und Niederösterreich nördlich der Donau) sind derzeit noch keine Daten vorhanden. Bei Anwendung der Anleitung in diesen Gebieten sind daher besonders gute Gebietskenntnisse und Informationen über die meteorologischen Randbedingungen (realistisches Worst-Case-Szenario) notwendig.

Es laufen Arbeiten des LWF in Freising um über den Vergleich mit Berechnungen auf gezielt ausgewählten Testflächen die Geländeanleitung für norddeutsche Mittelgebirge zu adaptieren.

Der Gültigkeitsbereich der Anleitung ist auf den Bereich  $30 < i_N < 120$  mm/h limitiert. In den letzten Jahren wurden in einigen alpinen Einzugsgebieten konvektive Niederschläge mit  $i_N > 150$  mm/h und  $> 200$  mm/h beobachtet (z.B. Fischbach bei Thalgau in Salzburg - Hübl et al. 2003). Die bei diesen Ereignissen beobachteten Extremabflüsse werden vielfach als Hinweis angesehen, dass bei derartig extremen Intensitäten die lineare Extrapolation der im Kapitel Randbedingungen erwähnten Beziehung von Kohl und Markart (2002) über 120 mm/h hinaus nicht ohne Einschränkung möglich ist. In Diskussionen unter Vertretern aus Wissenschaft und Praxis wurde mehrfach die Vermutung geäußert, dass ab  $i_N > 150$  mm/h die lineare Beziehung für  $i_N$  und  $\psi_{const}$  nicht mehr gilt. Die Abklärung, ob diese Annahme zutreffend ist oder nicht bzw. bei welchem  $i_N$  dieser Punkt für verschiedene repräsentative hydrologische Einheiten des Ostalpenraumes liegt, ist dringend notwendig.

## 10. Dank

Die Autoren bedanken sich herzlich bei ihren MitarbeiterInnen, die über eine Vielzahl von anstrengenden Feldversuchen dazu beitrugen eine umfangreiche Datengrundlage zu erstellen. Besondere Wertschätzung gebührt auch einer Vielzahl von KollegInnen aus Wissenschaft und Praxis, die in jahrelanger Kooperation und intensiver Diskussion zur Verwirklichung der Geländeanleitung beigetragen haben. Mag. Roland Luzian danken wir sehr herzlich für die Durchsicht des Manuskripts.

## 11. Literatur

American Society for Testing Materials (1966) Classification for engineering purposes. ASTM - Destination 2487 - 66 T.

Barben, M., F. Forster, C. Hegg und R. Weingartner (2002) Länderbericht Schweiz. In: Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen - Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Bericht Nr. 19. 11-73.

Bunza, G. (1984) Oberflächenabfluß und Bodenabtrag in alpinen Graslandökosystemen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, 12, 101-109.

Bunza, G. (1989) Oberflächenabfluß und Bodenabtrag in der Alpenen Grasheide der Hohen Tauern an der Großglockner-Hochalpenstraße". - Österr. Akademie der Wiss., Veröff. des österr. MaB-Programms, Bd. 13, Universitätsverlag Wagner - Innsbruck 1989, 155-200.

Bunza, G. und Schauer, T. (1989) Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der

Bayerischen Alpen. Informationsber. 2/89 d. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft, München.

Bunza, G., P. Jürging, R. Löhmannsröben, T. Schauer und R. Ziegler (1996) Abfluß- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten - Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftenreihe des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 27, 25-36.

DIN 18196 (1988) Erd- und Grundbau. Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

Ellenberg H. (1986) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. 4. verb. Aufl., Ulmer-Verlag, Stuttgart.

Ellenberg H., E. Weber, R. Düll, V. Wirth, W. Werner und D. Paulissen, (1991) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Verlag Erich Goltze KG, Göttingen.

Hübl, J., E. Ganahl, H. Gruber, G. Holzinger, M. Moser, A. Pichler (2003) Hydrologische Simulation des Hochwasserereignisses vom 17. Juli 02 am Fischbach, WLS Report 87 Band 2, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien. Im Auftrag der WLV Sektion Salzburg (unveröffentlicht).

Izzard, C.F. (1946) Hydraulics of runoff from developed surfaces, in Proc. Highway Research Board. Proc., Vol.26, 129-150.

Johannes, B. (1995) Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen von Almweideflächen im Nationalpark Berchtesgaden. Forstw. Cbl. 144, 293-101.

Kohl B. (2000) Vegetation als Indikator für die Abflussbildung. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000 - Villach / Österreich, Tagungspublikation, Band 2, 41-51.

Kohl, B. (2002) Bodenphysikalische Charakterisierung von Profilen in Wildbacheinzugsgebieten. In: Mitt. Österr. Bodenkundl. Ges., Heft 65. Workshop: Bodenphysikalische Verfahren im Rahmen von Boden- und Landschaftsschutz, 19.10.2001, Innsbruck., 121-122.

Kohl, B. and G. Markart (2002) Dependence of surface runoff on rain intensity - Results of rain simulation experiments. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin: Proceedings of the International Conference on Flood Estimation, March 6-8, Berne, Switzerland, 139-146.

Kohl, B., G. Markart, T. Schauer und M. Porzelt (2002) Vergleich zweier Großregenanlagen zur Abschätzung des Abfluss- und Infiltrationsverhaltens von unterschiedlichen Boden-/Vegetationskomplexen. BFW-Bericht Nr. 127, 31-44.

Kohl, B. and G. Markart (2003) Surface roughness and its influence on overland flow. Proceedings: International Workshop on Mountain Hydrology, April 2-4, 2003, Einsiedeln, Switzerland, S. 13.

Kölla, E. (1986) Zur Abschätzung von Hochwässern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitt. VAW-ETH Zürich, Nr.87.

Landolt, E. (1977) Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich.

Löhmansröben, R., O. Altfeld, G. Bunza, M. Eidt, A. Fischer, P. Jürging, T. Schauer and R. Ziegler (2000) Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 87.

Markart, G. und B. Kohl (1993) Physikalische Charakteristika der Böden im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach. Unveröffentlichter Projektbericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 91 Seiten.

Markart, G. und B. Kohl (1995) Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten. Ergebnisse der Berechnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg. FBVA-Bericht Nr. 89, 38 Seiten.

Markart, G., B. Kohl, K. Kohl und P. Zanetti (1996) Integralmelioration "Vorderes Zillertal" - Einfluss von Boden, Vegetation und rezenter Bewirtschaftung auf den Abfluss bei Starkregen. Unveröffentlichter Bericht der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Wien, 131 Seiten.

Markart, G., B. Kohl und P. Zanetti (1997) Oberflächenabfluss bei Starkregen - Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchtfächen (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesa - Bürserberg, Vorarlberg). Cblt. ges. Forstwesen (Austrian J. Forest Research), 114. Jg., Heft 2/3, 123-144.

Markart G., B. Kohl, G. Poscher, W. Wanker and I. Schnetzer (1999) Assessment of runoff characteristics in a torrent catchment area. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, 22-27. August, Graz.

Markart, G., B. Kohl, W. Gallmetzer und A. Pramstraller (2000) Wirkungen von Begrünungen auf das Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei Starkregen. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000 - Villach / Österreich, Tagungspublication, Band 2, 53-64.

Markart, G. (2002) Kleinräumige Variabilität und Aussagekraft bodenphysikalischer Kennwerte in Wildbacheinzugsgebieten. In: Mitt. Österr. Bodenkundl. Ges., Heft 65. Workshop: Bodenphysikalische Verfahren im Rahmen von Boden- und Landschaftsschutz, 19.10.2001, Innsbruck, 123-124.

Markart, G. und B. Kohl (2004) Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei unterschiedlicher Landnutzung. Wildbach- und Lawinenverbau, Heft 149, 9-20.

- Markart G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2004) Provisorische Geländeanleitung zur Anschätzung des Oberflächenabflusses auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Nr.3.
- Morgan, R.P.C. (2004) Vegetative-based Technologies for Erosion. International Conference on ECO-Engineering "The Use of Vegetation to improve Slope Stability". 13-17 Sept. 2004, Thessaloniki, Greece, book of abstracts, p. 120.
- Prinz, H. (1991) Abriss der Ingenieurgeologie. 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Rickli, C. und F. Forster (1997) Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen. Vol. 148, Heft 5, 367-385.
- Schaffhauser, H. (1982) Untersuchungen über das Abflußverhalten verschieden bewirtschafteter Versuchsflächen. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Band 144, 85-101.
- Schaffhauser, H. (1988) Berechnungsversuche im Einzugsgebiet des Dürnbaches. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band 161, 147-159.
- Schauer, T. (1988) Zur Problematik der Schipistenbegrünung. Rasen, Turf, Gazon, Heft 1 (Intern. Zeitschrift f. Vegetationstechnik für Forschung und Praxis).
- Schauer, T. (1992) Der Beitrag der Vegetationskartierung für die Abschätzung und Prognose des Abflusses, des Abtrags und der Belastung bei spezifischen Nutzungen in alpinen Wildbacheinzugsgebieten. Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Bern.
- Scherrer, S. (1997) Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. VAW-Mitteilungen, Nr. 147, ETH-Zürich.
- Scherrer, S. and F. Naef (2003) A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. Hydrological Processes, 17, 391-401.
- Schreiber, P. (1997) Geländeauffüllungen: Probleme mit der Qualität der geschütteten Böden. Umweltpraxis Nr. 13, Feb. 1997. 67-70.
- SCS (1985) National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C.
- Schriftleitner, U. und U. Smolczyk (1990 - Hsg.) Grundbau-Taschenbuch. 4. Auflage, Teil 1, Verlag Ernst Sohn, Berlin.
- Vogt, S. und F. Forster (1999) Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten - Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasserganglinie. Interner Hydrologie-Bericht B360, Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen, Eidgen. Forschungsanstalt f. Wald, Schnee und Landschaft (WSL).

Vogt, S. (2001) Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten. Diplomarbeit - Departement Erdwissenschaften, ETH-Zürich.

Zanetti, P. (1996) Einfluß physikalischer Bodencharakteristika, der Bestandesphytomasse und der Nutzungsart auf die Infiltrationseigenschaften verschiedener Boden-/Vegetationseinheiten des Finsingtales (Zillertal/Tirol). Diplomarbeit, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck.

Zeller, J. (1974, 1981) Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. Eidgen. Anst. Forstl. Versuchsw., Bericht Nr. 126., 1. und 2. Auflage.

**Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Markart  
Mag. Bernhard Kohl  
Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen  
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft  
(BFW)  
Rennweg 1 - Hofburg  
A-6020 Innsbruck  
Email: Gerhard.Markart@uibk.ac.at , Bernhard.Kohl@uibk.ac.at

Dipl.-Geogr. Bernadette Sotier  
Ecking 81/5  
D-83083 Riedering  
Email: Bernadette.Sotier@t-online.de

Dr. Thomas Schauer  
D-82538 Gelting  
Ziegelei 6  
Email: Thomas.Schauer@gmx.de

Univ.Doiz. Dr. Günther Bunza  
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft  
Edmund-Rumpler-Str. 7  
D-80939 München  
Email: Guenther.Bunza@lfw.bayern.de

Dipl.-Ing. Dr. Roland Stern  
Botanikerstraße 5  
A-6020 Innsbruck

## REGIONALISIERUNG VON EREIGNISKENNGRÖSSEN

Ralf Merz

### 1. Einleitung

Eine wichtige Aufgabe der praktischen Hydrologie ist die Modellierung des Niederschlag-Abflussprozesses in unbeobachteten Gebieten, d.h. in Gebieten in denen keine Abflussbeobachtungen vorliegen. Für die Modellierung sind Modellparameter erforderlich, die für das Niederschlagsverhalten, die Abflussbildung und Abflusskonzentration des entsprechenden Ereignisses repräsentativ sind. In beobachteten Gebieten, d.h. in Gebieten mit Abflussbeobachtungen, werden die Modellparameter in der Regel anhand der Beobachtungsdaten geeicht. In unbeobachteten Gebieten können die Parameter aus benachbarten beobachteten Gebieten übertragen oder durch einen funktionalen Zusammenhang mit Gebiets- und Ereignisseigenschaften geschätzt werden.

Für die Bestimmung der Kenngrößen für Niederschlag, Abflussbildung und Abflusskonzentration gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen in der Literatur, die in zwei Typen unterteilt werden können. Der eine Typ beruht auf der räumlichen Übertragung von Ereigniskenngrößen aus benachbarten ähnlichen Gebieten mit Abflussbeobachtungen. Der zweite Typ sind empirische Formeln, die die Kenngrößen mit Gebieteigenschaften in funktionalen Zusammenhang stellen. Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages liegt auf dem zweiten Typ, der Relation von Ereigniskenngrößen und Gebieteigenschaften. Für die Verfahren zur Übertragung der Ereigniskenngrößen von benachbarten ähnlichen Gebieten sei der interessierte Leser auf die Beiträge zu den Grundlagen der hydrologischen Regionalisierung dieses Seminars verwiesen.

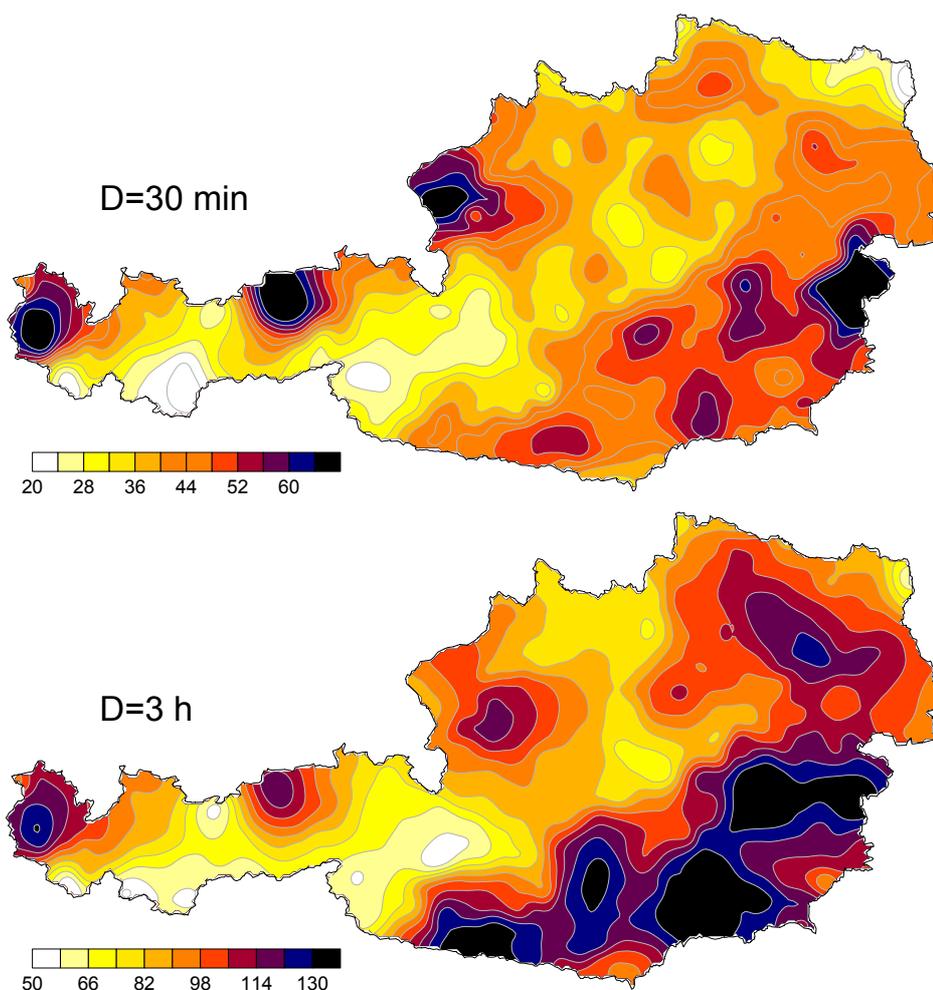
### 2. Niederschlag

Ein wichtiger Punkt für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung in unbeobachteten Gebieten ist die Frage, welcher Niederschlag, d.h. welche Niederschlagshöhe, Niederschlagsdauer und Jährlichkeit, für eine Bemessungsaufgabe maßgebend ist. Im Folgenden wird kurz auf regionale Auswertungen von Ereigniskenngrößen des Niederschlages eingegangen. Verfahren zur Regionalisierung des Niederschlages sind in Weilguni (2006) zu finden.

Die Basis zur Ermittlung des Bemessungsniederschlages bilden statistische Auswertungen von Niederschlagsdaten, die häufig in Form von Niederschlag-Intensitäts-Diagrammen oder Dauer-Intensitäts-Häufigkeits-Diagrammen dargestellt werden. Im hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES, 2002) stehen Karten zur Verfügung, aus denen Niederschlag-Intensitäts-Diagramme abgeleitet werden können. Für Deutschland liegen solche Auswertungen in Form des KOSTRA Atlas (Bartels et al., 2005) vor. Das KOSTRA Verfahren wurde für Österreich adaptiert (ÖKOSTRA-93) (Skoda, 1993).

Die Qualität dieser regionalisierten Niederschläge hängt stark von den verfügbaren Daten ab. So ist in niederen Regionen mit einem dichten Netz an Niederschlagsstationen mit einer besseren Qualität zu rechnen als im alpinen Raum mit wenigen Niederschlagsstationen. Um Informationslücken, die in datenarmen Regionen bestehen, zu schließen, wurden von Lorenz und Skoda (2000) die statistischen Datenauswertungen mit einem meteorologischen Modell gekoppelt. Hieraus wurden flächendeckende Bemessungsniederschläge verschiedener Dauerstufen und Jährlichkeiten berechnet. Im hydrologischen Atlas von Österreich (HAÖ) (BMLFUW, 2003) liegen Karten von konvektiven Starkniederschlägen der Dauerstufen 15, 60 und 180 Minuten für die Jährlichkeiten 2, 10, 50 und 100 Jahre vor.

Ein alternatives Verfahren zur Bestimmung von regionalen Niederschlägen für extreme Ereignisse sind Auswertungen von Hüllkurven. Hüllkurven beschreiben die obere Einhüllenden aller maximalen beobachteten Ereignisse einer Region. In Blöschl et al. (2005) wurden regionale Hüllkurven von Starkniederschlägen bestimmter Dauerstufen untersucht.



**Abb. 1:** Hüllkurven des Niederschlags für Dauerstufen 30 Minuten und 3 Stunden ermittelt aus den größten beobachteten Starkniederschlägen der Jahre 1948-1993 (Werte in mm).

Dabei wurden die größten beobachteten Niederschläge für bestimmte Dauerstufen mit geostatistischen Verfahren regionalisiert. Ein Beispiel zeigt Abb. 1. Auffallend sind die hohen Niederschlagswerte im Südosten Österreichs. Der Vorteil solcher Hüllkurvenauswertungen besteht darin, dass tatsächlich beobachtete Extremwerte herangezogen werden. Ein Problem von Hüllkurven ist, dass die Werte keiner Jährlichkeit zugeordnet sind. Unter Annahme der statistischen Unabhängigkeit der Einzelwerte (die vor allem bei kurzen Ereignissen als zutreffend angesehen werden kann) lässt sich jedoch aus der Stationsanzahl und der Reihenlänge die Jährlichkeit in Abb. 1 näherungsweise mit etwa 500 Jahren einschätzen. Ein Vergleich mit statistischen Auswertungen von Tagesniederschlägen deutet auf die Plausibilität dieser Einschätzung hin.

### 3. Abflussbildung

#### 3.1 Empirische Verfahren

Für die Berechnung der Abflussbildung gibt es eine Vielzahl von empirischen Formeln in der Literatur. Im Folgenden soll aus der Vielzahl von Methoden jene kurz diskutiert werden, deren Anwendung im deutschen Sprachraum weit verbreitet ist.

Das Verfahren von Lutz (1984) ist eine Methode zur Bestimmung von Abflussbeiwerten in unbeobachteten Gebieten. Beim Verfahren von Lutz erfolgt zunächst eine Trennung des Gesamtgebiets in unversiegelte (durchlässige) und versiegelte (undurchlässige) Teilgebiete. Für die versiegelten Teilgebiete wird in der Regel ein Anfangsverlust von  $A_V=1\text{mm}$  und ein Abflussbeiwert von  $\psi=1.0$  angesetzt. Für unversiegelte Teilgebiete wird anhand der Landnutzung und des Bodentyps ein gebietspezifischer Endabflussbeiwert bestimmt. Der Gebietsrückhalt wird nun wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 R &= N - N_{eff} = N - (N_{eff}^u + N_{eff}^s) \\
 N_{eff}^u &= \left[ (N - A_V^u) \cdot c + \frac{c}{a} \cdot (e^{-a(N - A_V^u)} - 1) \right] \cdot \frac{A - A_s}{A} \\
 N_{eff}^s &= (N - A_V^s) \cdot \varphi_s \cdot \frac{A_s}{A}
 \end{aligned} \tag{1}$$

mit Gebietsrückhalt  $R$  (mm), Gebietsniederschlag  $N$  (mm), abflusswirksamer Niederschlag  $N_{eff}$  (mm), abflusswirksamer Niederschlag von unversiegelten Flächen  $N_{eff}^u$  (mm), abflusswirksamer Niederschlag von versiegelten Flächen  $N_{eff}^s$  (mm), Anfangsverlust  $A_V^u$  (mm) für unversiegelte Flächen, Anfangsverlust  $A_V^s$  für versiegelte Flächen, maximaler Abflussbeiwert nach sehr großen Niederschlägen  $c$  (-), Einzugsgebietfläche  $A$ , versiegelte Einzugsgebietsfläche  $A_s$  und Abflussbeiwert für die versiegelten Flächen  $\varphi_s$ . Anfangsverluste und Endabflussbeiwert für verschiedene Bodentypen und Landnutzungen sind in Tab. 1 und 2 tabelliert.

**Tab. 1:** Anfangsverluste (mm) für das Verfahren nach Lutz

Landnutzung	Bodentyp A	Bodentyp B	Bodentyp C	Bodentyp D
Landwirtschaftliche Flächen	7.0	4.0	2.0	1.5
Bewaldete Flächen	8.0	5.0	3.0	2.5
Versiegelte Flächen	1.0	1.0	1.0	1.0

**Bodentyp:**

A: Schotter, Kies, Sand (kleinster Abfluss)

B: Feinsand, Löß, leicht tonige Sande

C: Bindige Böden mit Sand, Mischböden: Lehmgiger Mehlsand, Sandiger Lehm, toniger Lehmsand

D: Ton, Lehm, dichter Fels, stauender Untergrund (größter Abfluss)

**Tab. 2:** Endabflussbeiwert  $c$  (-) für das Verfahren nach Lutz

Landnutzung	Bodentyp A	Bodentyp B	Bodentyp C	Bodentyp D
Waldgebiet	0.17	0.48	0.62	0.70
Ödland	0.71	0.83	0.89	0.93
Reihenkultur: Hackfrüchte, Weinbau u.ä.	0.62	0.75	0.84	0.88
Getreideanbau, Weizen, Roggen, u.ä.	0.54	0.70	0.80	0.85
Leguminosen: Kleefeld, Luzerne, Ackerfrüchte, u.ä.	0.51	0.68	0.79	0.84
Weideland	0.34	0.60	0.74	0.80
Dauerwiese	0.10	0.46	0.63	0.72
Haine, Obstanlagen, u.ä.	0.17	0.48	0.66	0.77

Der Proportionalitätsfaktor  $a$  (1/mm) ist vom Ereignis abhängig und kann wie folgt berechnet werden:

$$a = C1 \cdot e^{-C2/WZ} \cdot e^{-C3/q_B} \cdot e^{-C4 \cdot T_D} \quad (2)$$

wobei  $WZ$  die Wochenzahl,  $q_B$  der Basisabfluss am Ereignisbeginn (l/s/km<sup>2</sup>),  $T_D$  die Niederschlagsdauer und  $C1$  bis  $C4$  gebietsabhängige Parameter sind. Die Parameter  $C1$  bis  $C4$  sollten jeweils an alle beobachteten Niederschlag-Abfluss-Ereignisse innerhalb einer hydrologisch homogenen Region angepasst werden. Das Verfahren nach Lutz ist in dem „Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft“ des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, der Universität Karlsruhe implementiert.

Ein weltweit weit verbreitetes und auch in Österreich häufig angewandtes Verfahren zur Bestimmung des Abflussbeiwertes von Hochwasserereignissen in kleinen unbeobachteten Gebieten ist das SCS-CN Verfahren des US Soil Conservation Service (US-SCS, 1972; DVWK, 1984). Die Intention des SCS-CN Verfahrens ist, ähnlich

dem Lutz Verfahren, den Ereignisabflussbeiwert für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen als Funktion des Ereignisniederschlages und einer Kurvennummer zu berechnen. Die Kurvennummer ist eine Funktion von Bodentyp, Landnutzung und Regen der vorangegangenen 5 Tage als Maß für die Vorbefeuchtung. Das SCS-CN Verfahren ist leicht auch in Gebieten ohne Abflussbeobachtungen anwendbar.

Im SCS-CN Verfahren wird Ereignisabflusshöhe  $\hat{N}_{eff}$  wie folgt berechnet:

$$\hat{N}_{eff} = c_1 \cdot \frac{\left( \frac{N}{c_1} - \frac{c_{in} \cdot 1000}{CN_i} + c_{in} \cdot 10 \right)^2}{\frac{N}{c_1} + \frac{(1-c_{in}) \cdot 1000}{CN_i} - (1-c_{in}) \cdot 10} \quad \text{für } \frac{N}{c_1} - \frac{c_{in} \cdot 1000}{CN_i} + c_{in} \cdot 10 > 0$$

$$\hat{N}_{eff} = 0 \quad \text{anderenfalls} \quad (3)$$

$N_{eff}$  ist die Ereignisabflusshöhe in mm,  $N$  ist der Ereignisniederschlag in mm,  $CN_i$  ist die Kurvennummer zwischen 1 und 100,  $c_l$  ist ein Umrechnungsfaktor von Zoll in Millimeter ( $c_l=25.4$  mm) und  $c_{in}$  ist ein Parameter, der den Anfangsverlust beschreibt. Eine Annahme des SCS Verfahrens besteht darin, dass der Anfangsverlust  $S_{in}$  proportional zur Speicherkapazität des Gebietes  $S_{max}$  angesetzt wird, d.h.

$$S_{in} = c_{in} \cdot S_{max} \quad (4)$$

wobei

$$S_{max} = \frac{1000}{CN_i} - 10 \quad (5)$$

Der US Soil Conservation Service (US-SCS, 1972) schlägt einen Wert von  $c_{in} = 0.20$  vor, der vom Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1984) übernommen wurde.

Die Kurvennummer  $CN_i$  nimmt je nach Vorregen einen der drei Werte  $CN_I$ ,  $CN_{II}$  oder  $CN_{III}$  an und wird nach Maniak (1988, S.329) aus der Kurvennummer  $CN$  bestimmt:

$$CN_I = \frac{CN}{2.334 - 0.01334 CN}$$

$$CN_{II} = CN \quad (6)$$

$$CN_{III} = \frac{CN}{0.4036 + 0.0059 CN}$$

Als Vorregen ist die Niederschlagssumme in den 5 Tagen vor dem Ereignis definiert. In der Vegetationsperiode (z.B. zwischen April und Oktober) wird für einen Vorregen kleiner als 30 mm die Bodenfeuchteklasse I ( $CN_I$ ), zwischen 30 und 50 mm die Bodenfeuchteklasse II ( $CN_{II}$ ) und größer 50 mm die Bodenfeuchteklasse III ( $CN_{III}$ ) gewählt. Für die übrige Zeit wird für einen Vorregen kleiner als 15 mm die

Bodenfeuchteklasse I ( $CN_I$ ), zwischen 15 und 30 mm die Bodenfeuchteklasse II ( $CN_{II}$ ) und größer 30 mm die Bodenfeuchteklasse III ( $CN_{III}$ ) gewählt.

Die Kurvennummer  $CN$  ist in US-SCS (1972) und DVWK (1984) tabelliert. Die Tabellenwerte wurden in US-SCS (1972) aus beobachteten Ereignissen in vielen Gebieten bestimmt. Ein Wert von  $CN=100$  bedeutet, dass der gesamte Niederschlag während eines Ereignisses zum Abfluss kommt, kleinere Werte entsprechen geringerem Abfluss.

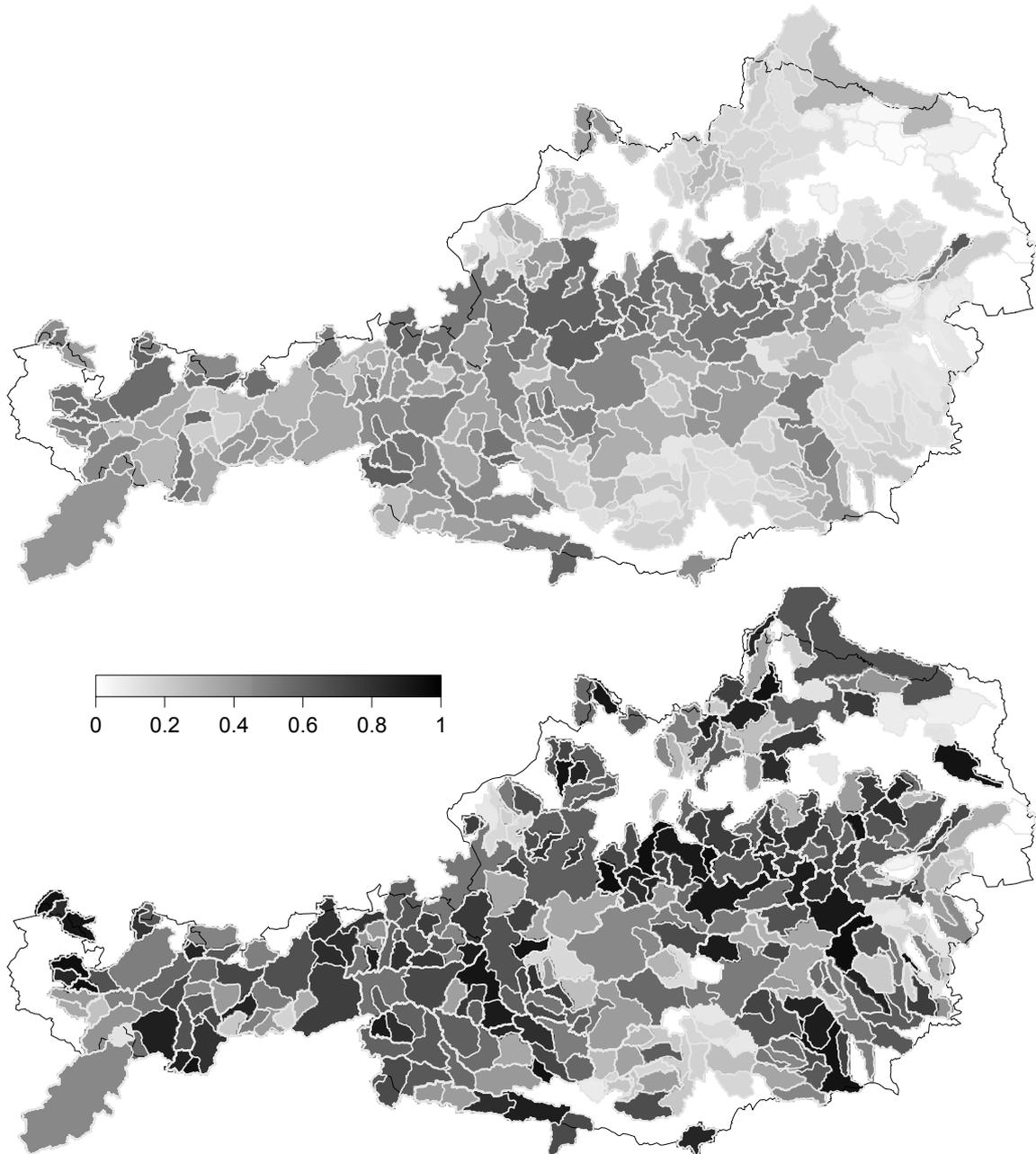
### **3.2 Regionale Auswertung von Abflussbeiwerten in Österreich und Bewertung empirischer Verfahren**

In Merz et al. (2006) wurden für den Zeitraum 1981-2001 Abflussbeiwerte von ca. 50000 Ereignissen in 326 österreichischen Einzugsgebieten ausgewertet. Die Einzugsgebietsfläche betrug zwischen 80 und 10000 km<sup>2</sup>. Es wurden flächendeckende Gebietsniederschläge in einer stündlichen Auflösung ermittelt. Schneerückhalt und Schneeschmelze wurden durch Modellierung der täglichen Wasserbilanz mit Hilfe eines kontinuierlichen Konzeptmodells berücksichtigt. Durch Basisabflussabtrennung und Ereignisabtrennung wurden Ereignisabflusshöhen aus stündlichen Abflussdaten bestimmt und mit den Ereignisniederschlagshöhen verglichen.

In Abb. 2 (oben) ist der Mittelwert der Abflussbeiwerte aller Ereignisse für jedes Einzugsgebiet dargestellt. Abb. 2 (oben) zeigt, dass sich in Österreich im wesentlichen vier Regionen in Hinblick auf die Abflussbereitschaft unterscheiden lassen. Am regenreichen Alpennordrand sind die Abflussbeiwerte am größten. Für Ereignisse mit Niederschlägen  $N > 5$  mm ist der Abflussbeiwert im Mittel ca. 0.5 und höher. Im trockenen Osten Österreichs sind die Abflussbeiwerte am kleinsten. Im Mittel sind sie kleiner als 0.1. In den voralpinen Gebieten Niederösterreichs und im steirischen Hügelland im Südosten sind die Abflussbeiwerte im Mittel um 0.2. In den hochalpinen Gebieten Tirols und Osttirols und im südlichen Kärnten nahe der italienischen Grenze sind die Abflussbeiwerte im Mittel ca. 0.5. Insgesamt scheint das räumliche Muster der mittleren Abflussbeiwerte ein Abbild des mittleren Jahresniederschlages zu sein (Weilguni, 2006). Höhere mittlere Abflussbeiwerte ergeben sich für die Gebiete in den regenreichen Regionen am Alpennordrand. Dies deutet auf die Rolle der Vorbefeuchtung der Gebiete hin. Niederschläge in den regenreichen Regionen dürften oft auf Böden fallen, die nur noch geringe Wassermengen zur Speicherung aufnehmen können. In den regenärmeren Gebieten im Osten und Südosten Österreichs sind deutlich geringere Abflussbeiwerte zu erkennen. Aufgrund der geringeren Vorbefeuchtung dürfte für die meisten Ereignisse mehr Niederschlag im Boden gespeichert werden können.

Interessant ist die Abflussbereitschaft im Hochwasserfall. Abb. 2 (unten) zeigt für jedes Einzugsgebiet den Abflussbeiwert des größten Ereignisses, d.h. desjenigen Ereignisses, das den größten Scheiteldurchfluss aller ausgewerteten Ereignisse besaß. Die Ereignisabflussbeiwerte sind durchwegs wesentlich größer als die mittleren Werte aller Ereignisse. Am Alpennordrand sind die Abflussbeiwerte dieser Ereignisse um 0.8, in Ostösterreich um 0.1, in den weiteren Regionen Österreich ungefähr um 0.5.

Die räumliche Variabilität der Einzelwerte ist größer als die der mittleren Abflussbeiwerte. Das bedeutet, dass je nach Einzelfall der Abflussbeiwert signifikant vom räumlichen Trend abweichen kann. Große Unterschiede zeigen sich auch im Vergleich der Abflussbeiwerte der größten Ereignisse mit den Abflussbeiwerten der zweitgrößten Ereignisse der Beobachtungsreihe (hier nicht dargestellt). Die zwei größten Ereignisse können ziemlich unterschiedliche Abflussbeiwerte besitzen. Die Unterschiede dürften vor allem auf die Vorbefeuchtung zurückzuführen sein. Das generelle, regionale Muster von größeren Abflussbeiwerten am niederschlagsreichen Alpennordrand ist aber immer ähnlich.

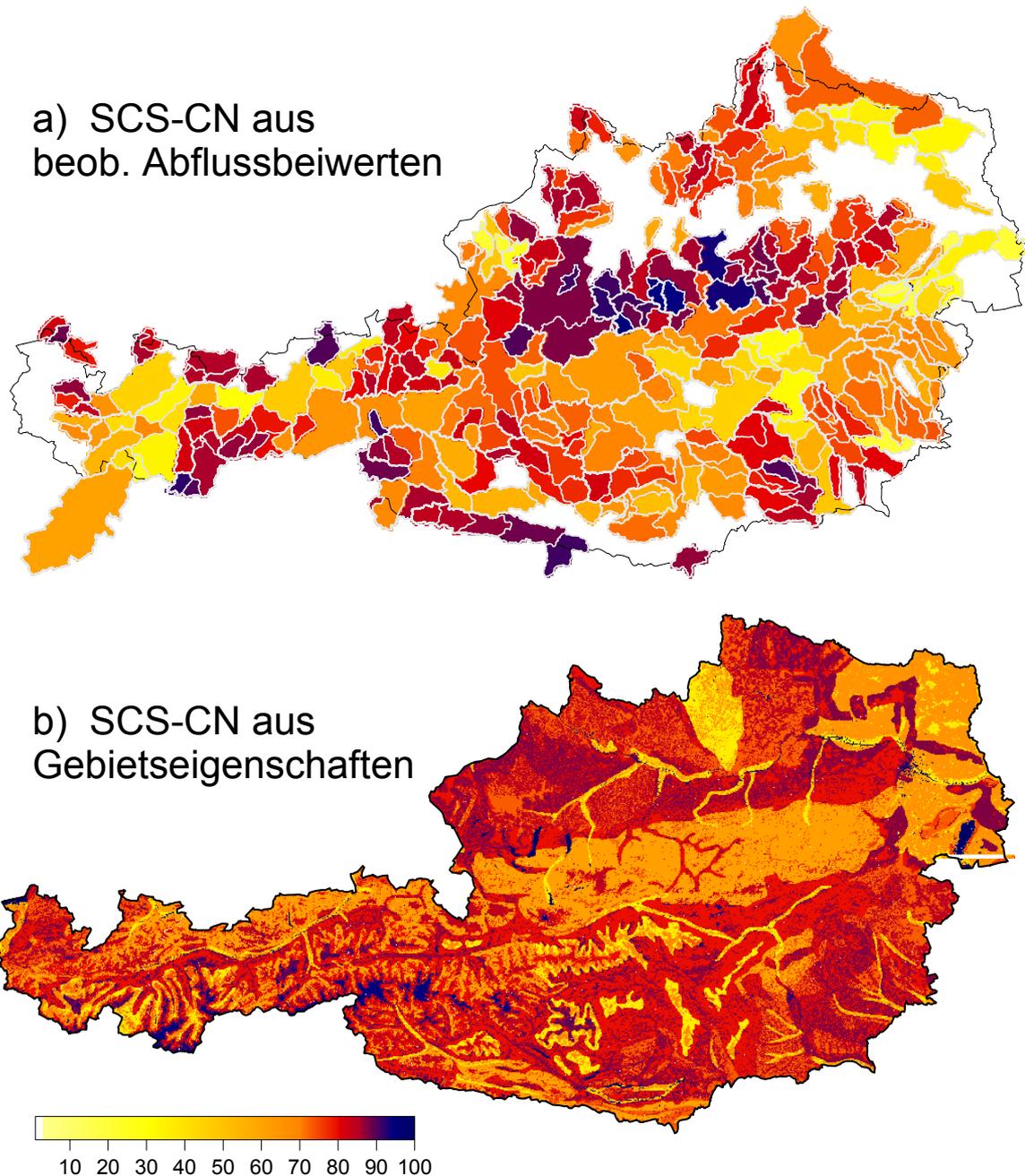


**Abb. 2:** Mittlerer Abflussbeiwert (oben) und Abflussbeiwert des Ereignisses mit dem größten Abflussscheitel (unten)

Die Ergebnisse der regionalen Ereignisanalyse kann nun dazu verwendet werden, die Güte von Schätzverfahren des Abflussbeiwertes in unbeobachteten Gebieten zu untersuchen. Aus den beobachteten Abflussbeiwerten der Untersuchungsregion wurden die Kurvennummer des SCS-CN Verfahrens rückgerechnet. Hierzu wurde für jedes Pegelinzugsgebiet die SCS-CN Kurvennummer variiert und unter Berücksichtigung des jeweiligen Vorregens über 5 Tage der Ereignisabfluss nach dem SCS-CN Verfahren aus dem Ereignisniederschlag berechnet. Dieser Ereignisabfluss wurde nun mit dem aus den Abflussdaten ermittelten Ereignisabfluss verglichen. Die zutreffende Kurvennummer wurde durch Minimierung der quadratischen Differenzen über alle Ereignisse eines Gebietes bestimmt.

Zwei Fälle wurden untersucht. Im erstem Fall wurde dem Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1984) folgend von einem Anfangsverlust von 20% der Speicherkapazität des Gebietes ausgegangen ( $c_{in} = 0.20$  in Gl. 4). Maniak (1988, p. 330) weist darauf hin, dass dieser Wert für mitteleuropäische Verhältnisse oft zu hoch ist und schlägt die Verwendung von  $c_{in} = 0.05$  vor, was in einem zweiten Fall untersucht wurde. Eine Analyse der Anpassungsgüte der vorliegenden Daten zeigt, dass der Fall für  $c_{in}=0.05$  durchwegs eine etwas bessere Anpassungsgüte als der Fall für  $c_{in}=0.20$  erzielt. Beispielsweise ist bei 80% der Gebiete der mittlere quadratische Fehler (rmse) kleiner als 13 mm ( $c_{in}=0.05$ ) bzw. kleiner als 15mm ( $c_{in}=0.20$ ). Deshalb wird für österreichische Verhältnisse der kleinere Werte für den Anfangsverlust (z.B.  $c_{in}=0.05$ ) als zutreffender angesehen.

In Abb. 3 (oben) sind die aus den beobachteten Abflussbeiwerten rückgerechneten SCS-CN Werte und in Abb. 3 (unten) sind die SCS-CN Werte als Funktion von Bodentyp und Landnutzung nach DVWK (1984) dargestellt. Für die Bestimmung nach DVWK (1984) wurde der Bodentyp (großes bis geringes Versickerungsvermögen) aus der digitalen Bodenkarte Österreichs 1:1 000 000 (ÖGB, 2001) abgeleitet. Die Bodennutzung wurde aus LANDSAT Thematic Mapper Daten (Ecker et al., 1995) bestimmt. Die SCS-CN Werte aus Bodentyp und Landnutzung unterscheiden sich deutlich von den aus den Abflussbeiwerten rückgerechneten SCS-CN Werten. Für den stark bewaldeten Nordrand der Alpen mit Böden mit mittlerem Infiltrationsvermögen (Rendzina) werden aufgrund der Landnutzung und des Bodentyps nach DVWK (1984) kleine SCS-CN Werte ausgewiesen. Aus der Analyse der Abflussdaten ergeben sich jedoch dort wegen der großen Niederschläge die größten SCS-CN Werte Österreichs. Im niederschlagsarmen Osten sind die SCS-CN Werte aus Bodentyp und Landnutzung im Vergleich zu den aus den beobachteten Abflussbeiwerten rückgerechneten SCS-CN Werten viel zu groß. Insgesamt erscheinen für Österreich die zum Abfluss passenden SCS-CN Werte nicht so sehr ein Abbild des Bodentyps und der Landnutzung zu sein, sondern ein Abbild der Jahreswasserbilanz der Einzugsgebiete. Gebiete mit großen Jahresniederschlägen und einem damit verbundenen hohen durchschnittlichen Bodenfeuchtestatus weisen wesentlich größere CN Werte auf als Gebiete die durchschnittlich trocken sind.



**Abb. 3:** SCS-CN Kurvennummern aus beobachteten Niederschlags-Abflussereignissen (oben) und aus Gebietseigenschaften nach DVWK (1984) (unten) (Merz et al., 2006)

Das in der Praxis gängige SCS-CN Verfahren weist somit für österreichische Verhältnisse und Einzugsgebietsgrößen von 80 – 10000 km<sup>2</sup> zwei massive Defizite auf. Einerseits ist der meist angenommene Anfangsverlust von 20% der Speicherkapazität des Gebietes für österreichische Verhältnisse zu hoch. Ein Wert von 5% ist besser geeignet. Andererseits berücksichtigt das SCS-CN Verfahren die Vorbefeuchtung nur über den Niederschlag in den 5 Tagen vor dem Ereignis (Vorregen). Dies erscheint für österreichische Verhältnisse nicht repräsentativ für den Feuchtezustand eines Gebietes zu sein, sowohl in Hinblick auf die regionalen Unterschiede als auch auf die Unterschiede zwischen den Ereignissen. Der

Feuchtezustand der Gebiete wird in diesen Klimaregionen durch Niederschlag und Verdunstung über einen wesentlich längeren Zeitraum bestimmt. Die beiden Hauptparameter beim SCS-CN Verfahren sind der Bodentyp und die Landnutzung. Da diese auch beim Verfahren von Lutz die dominanten Parameter sind, scheint auch dieses Verfahren nicht für österreichische Verhältnisse geeignet zu sein.

Eine Möglichkeit, den Feuchtezustand des Gebietes besser zu berücksichtigen, ist die Aneicherung der Kurvennummern beim SCS-CN Verfahren bzw. des Anfangsverlustes und des Endabflussbeiwertes beim Verfahren nach Lutz. Hierzu werden beobachtete Niederschlags-Abflussereignisse in der Region ausgewertet. Ähnlich dem oben beschriebenen Verfahren können z.B. Kurvennummern aus den ausgewerteten Ereignissen rückgerechnet werden. Es ist zu erwarten, dass solche angeeichten Parameter besser den Gebietszustand beschreiben als die Tabellenwerte und damit die Unsicherheit bei der Abschätzung der Ereigniskenngrößen reduzieren.

## 4. Abflusskonzentration (Konzentrationszeit)

### 4.1 Empirische Formeln

Die für die Praxis entwickelten Ansätze zur Beschreibung der Abflusskonzentration in unbeobachteten Gebieten bestehen vorwiegend aus Regionalisierungsansätzen der Parameter von Konzeptmodellen wie der Einheitsganglinie oder der linearen Speicherkaskade. Eine weltweit sehr bekannte Formel dieses Typs ist die Formel nach Kirpich (1940), in der die Konzentrationszeit eine Funktion von der Länge des Hauptvorfluters von der Wasserscheide bis zum Kontrollpunkt und der mittleren Neigung des Hauptvorfluters ist. Weitere ähnliche funktionale Zusammenhänge zwischen Abflusskonzentration und Gebietseigenschaften sind in DVWK (1984) angegeben.

Im Regionalisierungsansatz nach Lutz (1984) ergibt sich die mittlere Anstiegszeit  $t_A$  eines Einzugsgebietes zu

$$t_A = P1 \cdot \left( \frac{L \cdot L_c}{IG^{1.5}} \right) \cdot e^{-0.016U} \cdot e^{0.004W} \quad (9)$$

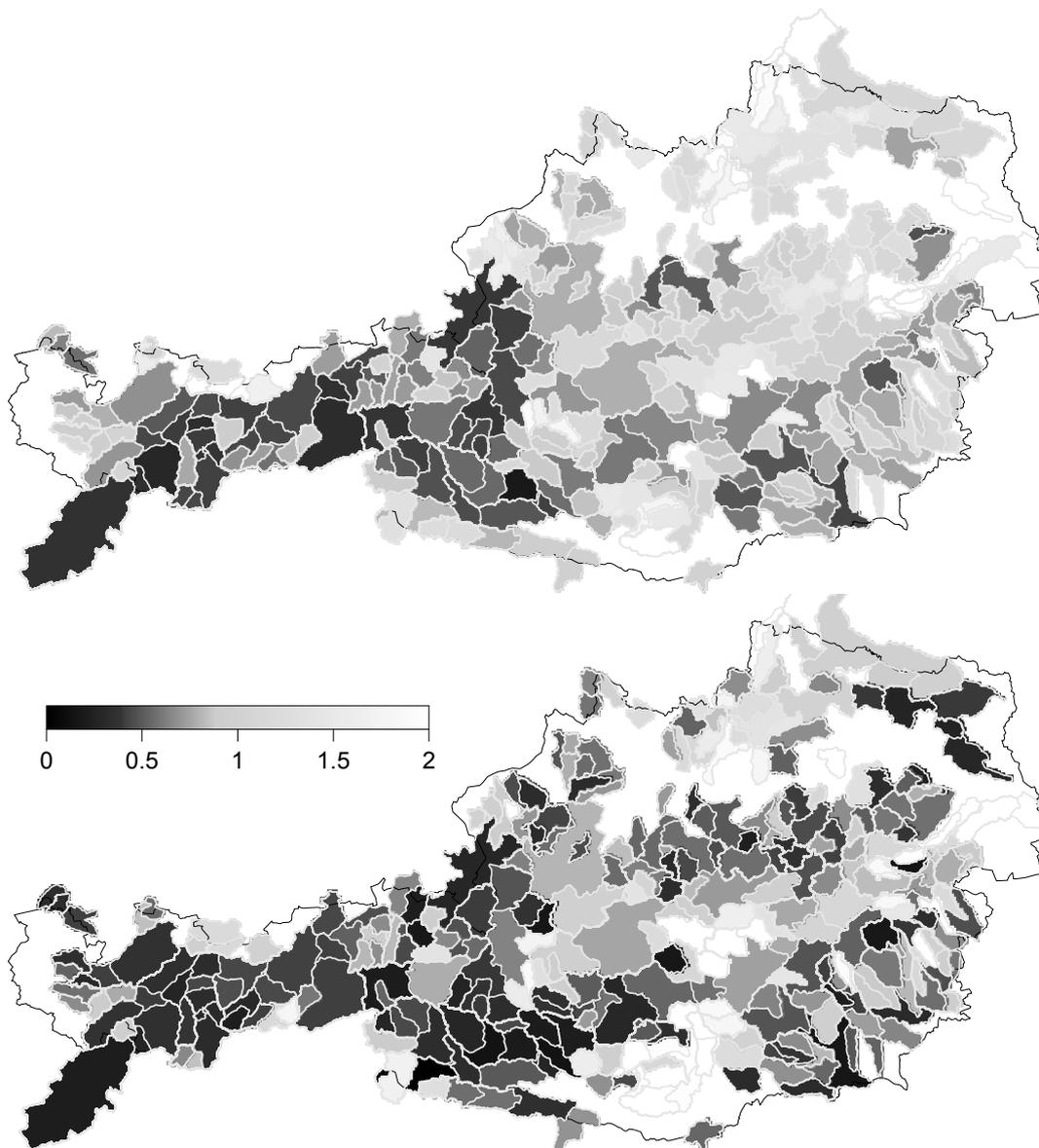
worin  $P1$  einen Gebietsfaktor,  $L$  die Länge des Hauptvorfluters (km),  $L_c$  die Länge des Hauptvorfluters bis zum Gebietsschwerpunkt,  $IG$  das gewogene Gefälle entlang des Hauptvorfluters (-),  $U$  den Bebauungsanteil (%) und  $W$  den Waldanteil (%) bezeichnen. Über einen Korrekturansatz erfolgt eine Anpassung an die Eigenheiten des Ereignisses. Der Korrekturansatz der Form  $t_{A,korr} = a1 \cdot a2 \cdot a3 \cdot t_A$  berücksichtigt die Ereignisparameter mittlere Niederschlagsintensität, Wochenzahl und mittleren Abflussbeiwert. Der Scheitelwert  $u_{max}$  ergibt sich zu  $u_{max} = c1 \cdot t_A^{-c2}$ , wobei  $c1$  und  $c2$  in Abhängigkeit vom Berechnungszeitschritt verschiedene Werte annehmen:  $c1=0.612, 0.556$  bzw.  $0.464$ ;  $c2=0.991, 0.933$  bzw.  $0.824$  für  $\Delta t=0.25, 0.5$  bzw.  $1$  h.

## 4.2 Regionale Auswertungen in Österreich

In Merz et al. (2006) wurden neben den Abflussbeiwerten auch Zeitkonstanten der Abflusskonzentration für ca. 50000 Ereignisse ausgewertet. Hierzu wurde nach Basisabflussabtrennung und Ereignisabtrennung das Ereignis mittels eines einfachen Niederschlag-Abflussmodells rückgerechnet. Die Abflussbildung wurde durch einen innerhalb des Ereignis zeitlich konstanten Abflussbeiwert beschrieben, die Abflusskonzentration wurde durch einen Linearspeicher mit der Zeitkonstante  $t_c$  beschrieben. Die Zeitkonstante ist in auch eine Funktion der Gebietsgröße, mit kurzen Konzentrationszeiten in kleinen Gebieten und langen Konzentrationszeiten in großen Gebieten. Um den Einfluss der Gebietsgröße zu berücksichtigen, wurde die Zeitkonstante normiert zu:

$$t_c^* = \frac{t_c}{5 \cdot A^{0.35}} \quad (10)$$

wobei  $t_c^*$  die normierte Zeitkonstante,  $t_c$  die Zeitkonstante (h) und  $A$  die Gebietsfläche (km<sup>2</sup>) ist. In Abb. 4 (oben) ist die mittlere normierte Speicherkonstante und in Abb. 4 (unten) ist die normierte Speicherkonstante des Ereignisses mit dem größten Abflussscheitel dargestellt. Das räumliche Muster der mittleren normierten Speicherkonstanten zeigt kürzere Zeiten im alpinen Bereich und im Südosten Österreichs. Langsame Reaktionen zeigen die Gebiete in den flacheren Teilen Österreichs, besonders im Bereich von Grundwasserleitern, wie z.B. im südlichen Wiener Becken. Die Reaktion der Ereignisse mit dem größten Abflussscheitel ist deutlich schneller. Die Karte deutet darauf hin, dass die Muster der Konzentrationszeiten komplexer sind, als wie sie mit Laufzeitformeln darstellbar wären. Daher ist auch zur einer genaueren Bestimmung der Abflusskonzentration in unbeobachteten Gebieten die Analyse regionaler Daten notwendig.



**Abb. 4:** Mittlere normierte Speicherkonstante  $t_c^*$  (oben) und normierte Speicherkonstante des Ereignisses mit dem größten Abflussscheitel (unten).

## 5. Schlussfolgerung

Zur Ermittlung von Ereigniskenngrößen zur Niederschlag-Abflussmodellierung in unbeobachteten Gebieten wurde eine Vielzahl von empirischen Formeln entwickelt. Vielfach wurden sie unkritisch auf Gebiete außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches angewendet. So zeigt z.B. das SCS-CN Kurvennummern Verfahren (US-SCS, 1972) für Österreich große Defizite. Daher sollten zur Bestimmung von Kenngrößen des Abflusses tabellierte Standardwerte der Verfahren nicht übernommen werden. Vielmehr sollten die Parameter an beobachtete Niederschlag-Abflussereignissen in der Region angeeicht werden. Das gleiche gilt für Laufzeitformeln. Diese Vorgehensweise entspricht den Empfehlungen im Flood Estimation Handbook (FEH) (IH, 1999), wenn möglich die Schätzungen auf beobachtete Abflussdaten zu gründen, auch wenn die

Beobachtungsreihe sehr kurz ist. Für unbeobachtete Gebiete ist die empfohlene Methode, die Kenngrößen von hydrologisch ähnlichen Gebieten zu übertragen, d.h. die Kenngrößen sind an die regionale Situation anzupassen.

Aufgrund der neueren digitalen Verfügbarkeit hydrologischer Daten (Müller, 2006) stellt sich die kontinuierliche Simulation der Wasserbilanz von Gebieten als Alternative zu den hier beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von Ereigniskenngrößen dar. Hierbei wird die Wasserbilanz eines Gebietes über einen längeren Zeitraum modelliert. Einerseits können somit direkt die gewünschte Ereignisse modelliert werden, andererseits können für Ereignisse Informationen über Abflussbildung und -konzentration aufgrund des Feuchtezustandes des Gebiets aus dem Modell abgeleitet werden. Untersuchungen zur Regionalisierung der Parameter solcher Modelle liegen vor (Parajka et al., 2005).

## 6. Danksagung

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

## 7. Literatur

Bartels, H., Dietzer, B., Malitz, G., Albrecht, F. M. und Guttenberger, J. (2005) Starkniederschlagshöhen für Deutschland, KOSTRA-DWD-2000, Fortschreibungsbericht, Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie, Offenbach

Blöschl, G., Merz, R., Laaha, G., Parajka, J. und Skoien, J. (2005) Regionale hydrologische Untersuchungen in Österreich, *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 83, 83-98.

BMLFUW (ed.) (2005) Hydrologischer Atlas Österreichs. Konvektive Starkniederschläge Blatt 2.5-2.7. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-85437-250-7.

DVWK (1984) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn.

Ecker, R., Kalliany, R. und Steinnocher K. (1995) Fernerkundungsdaten für die Planung eines Mobilfunknetzes. *Österr. Zeitschr. f. Vermessung und Geoinformation*, 83, 14-25.

Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES) (2002), (Ed. Weingartner, R. & Spreafico, M) Sechs Lieferungen mit insgesamt 42 Tafeln und 2 Auflegefolien, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

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

- Kirpich, Z.P. (1940) Time of concentration of small agricultural Watersheds, Civ. Eng. Am. Soc. Engrs, vol. 10, p362.
- Lorenz, P. und Skoda, G. (2000). Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ( $D \leq 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 80, 1-24.
- Lutz, W. (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilung Nr. 24 des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.
- Maniak, U. (1988) Hydrologie und Wasserwirtschaft, Springer-Verlag Berlin, 576 S.
- Merz, R., Blöschl, G., Parajka, D. (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (1), S.2-11.
- ÖBG (2001) Bodenaufnahmesysteme in Österreich. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Heft 62.
- Parajka, J., Merz, R. und Blöschl, G. (2004) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 57, H.3/4, S.43-56.
- Parajka, J., Merz, R., and Blöschl, G. (2005) A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157-171.
- Skoda, G. (1993) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung I: Erste Erfahrungen mit ÖKOSTRA-93. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 69, 29-32..
- US-SCS (1972) National Engineering Handbook Section 4 Hydrology. US Department of Agriculture.
- Weilguni, V. (2006) Regionalisierung des Niederschlags. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 71-92.

**Anschrift des Verfassers:**

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



# REGIONALISIERUNG BEI AUSGEWÄHLTEN GRUNDWASSERWIRTSCHAFTLICHEN FRAGESTELLUNGEN

Alfred Paul Blaschke

## 1. Einleitung

Die überwiegende Mehrzahl der grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen benötigen für ihre Beantwortung räumliche Informationen über das Verhalten und/oder den Zustand des betrachteten Grundwasserkörpers. Dabei kann man zwei Gruppen einteilen:

- Fragen die das Grundwasser selbst betreffen (Grundwasserquantität und -qualität)
- Fragen die von Grundwasserverhältnissen beeinflusst sind (Wasserhaltungen bei Baugruben, Ökologie...)

Bei beiden Gruppen von Fragestellungen ist eine Zunahme an Transdisziplinarität feststellbar. Insbesondere gilt dies bei Problemstellungen in Verbindung mit Auswirkungen auf die Umwelt (Umweltverträglichkeit, Naturschutz, ...) bzw. den Auswirkungen von Umweltveränderungen auf den Grundwasserhaushalt (Klimaänderung, ...).

Andererseits spielte eine disziplinübergreifende Bearbeitung (z.B. regionalisierte Interpretation der geologischen Verhältnisse) bei der Erarbeitung eines hydrologischen Verständnisses des betrachteten Grundwassersystems schon immer eine wesentliche Rolle, wobei eine deutlichere Akzentuierung der Einzeldisziplinen in diesem Prozess erkennbar ist (z.B. hydrogeologisches Modell als Basis eines Grundwassermodells).

Die wesentlichen Ziele der Regionalisierung grundwasserwirtschaftlicher Kennwerte ist deren räumliche Darstellung mit ihrer Variabilität, das Aufzeigen räumlicher Zusammenhänge und das Verfügbar machen dieser Kennwerte in Gebieten ohne direkte Messungen. Die Methoden der Regionalisierung wurden schon im Beitrag von Godina und Blöschl (2006) vorgestellt. Im folgenden Teil soll anhand von Praxisbeispielen das Spektrum der Regionalisierungsaufgaben bei grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen aufgezeigt werden.

## 2. Anwendung unterschiedlicher Regionalisierungsmethoden

### 2.1 Inter- und Extrapolation

Die Interpolation der gemessenen Grundwasserhöhen zur Konstruktion von Grundwasserschichtenplänen spielte und spielt bei grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen schon immer eine wichtige Rolle. Aus einem Grundwasserschichtenplan lassen sich über das betrachtete Grundwassersystem eine Reihe von weiteren wichtigen Kenngrößen ableiten:

- Allgemeine Strömungssituation
- Grundwasserfließrichtung
- Grundwassergefälle

und in Kombination mit anderen Kenngrößen

- Grundwasserfließgeschwindigkeit (Hydraulische Leitfähigkeit)
- Flurabstand (Geländemodell)
- Grundwassermächtigkeit (Staueroberkante)
- Ort und Art der Interaktion mit Oberflächengewässern (Höhenlage des Oberflächengewässers)

und nicht zuletzt zeigen sich bei der Konstruktion von Grundwasserschichtenplänen sehr rasch die vorhandenen Datenlücken, die zum Systemverständnis notwendig sind und eventuell vorhandene Datenfehler lassen sich schnell erkennen.

Die Konstruktion von Schichtenplänen erfolgt heute überwiegend mit Hilfe von Computerprogrammen, wodurch auch der Austausch der Ergebnisse bzw. eine Verbindung mit anderen räumlichen Informationen wesentlich erleichtert wird. Festzuhalten ist, dass jedes Interpolationsverfahren ein anderes Ergebnis liefert und von einem unkontrollierten Übernehmen von Computerergebnissen abgeraten werden muss.

Für Grundwasserschichtenpläne wurde und wird häufig eine lineare Interpolation verwendet, welche aber für eine eventuell notwendige Extrapolation ungeeignet ist. Immer öfter wird auch deshalb die Krigingmethode bei Interpolationen grundwasserwirtschaftlicher Kenngrößen verwendet. Die Polynom- und Splineinterpolation finden sich auch als Methoden bei der Konstruktion von Grundwasserschichtenplänen. Dass die Verfahren durchaus deutlich unterschiedliche Ergebnisse liefern ist in der Abb. 1 dargestellt. Dabei zeigt sich auch der Vorteil von linearer Interpolation und Krigingmethode, welche punkttreu (d.h. am Ort der Messung wird der Messwert wiedergegeben) sind.

Ebenfalls zum Verständnis eines Grundwassersystems tragen Differenzenpläne von Grundwasserspiegelhöhen unterschiedlicher Zeitpunkte bei. Bei dem in der Abb. 2 dargestellten Beispiel wurde auch der maximale Interpolationsfehler angegeben, welcher bei der Kriging-Methode einfach ermittelt werden kann, wobei Sinnhaftigkeit dieser Darstellung in Bereichen mit geringer Datendichte fraglich ist.

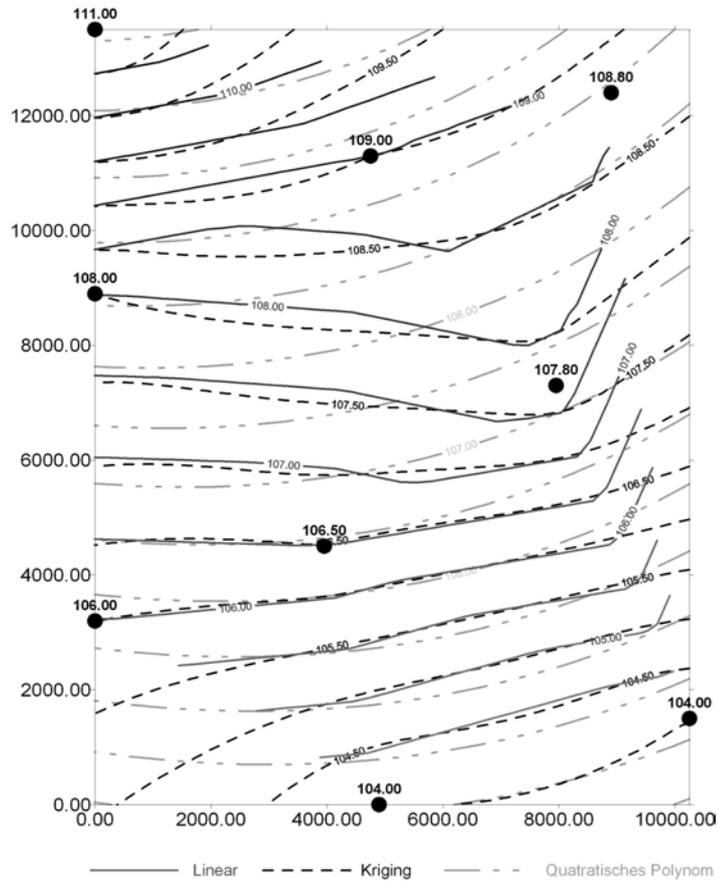


Abb. 1: Ergebnisse unterschiedlicher Interpolationsmethoden

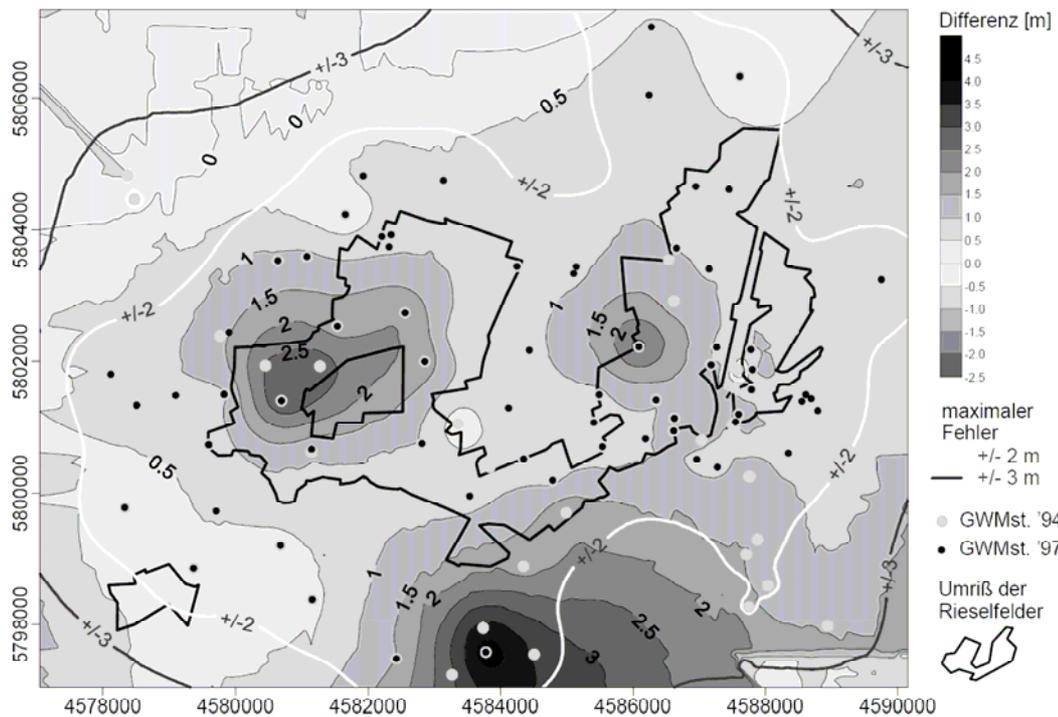
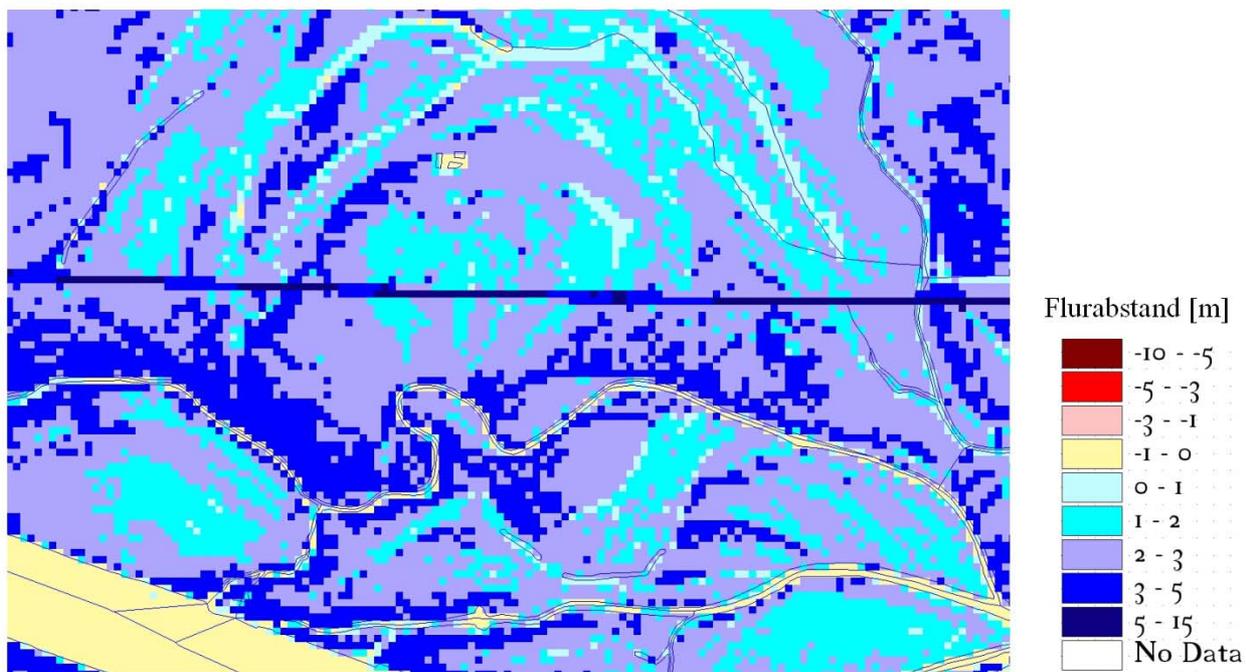


Abb. 2: Differenz der Grundwasserstände mit Angabe der maximalen Fehler, welche sich aus der Summe der Standardfehler der beiden zugrunde liegenden Grundwasserschichtenpläne errechnen (Grams, 2000)

Immer häufiger kommt es vor, dass nicht nur Vektor- sondern auch Rasterdarstellungen der Grundwasseroberfläche für weitere Bearbeitungen Verwendung finden. Dies ist beispielsweise häufig bei ökologischen Fragestellungen der Fall, bei denen der Grundwasserstand mit anderen Informationen verschnitten wird. In diesen Fällen kommen vorwiegend GIS Systeme zur Anwendung, welche die Möglichkeiten der Informationsverknüpfung bieten. Als Beispiel zeigt Abb. 3 einen auf diese Weise erstellten Flurabstandsplan.



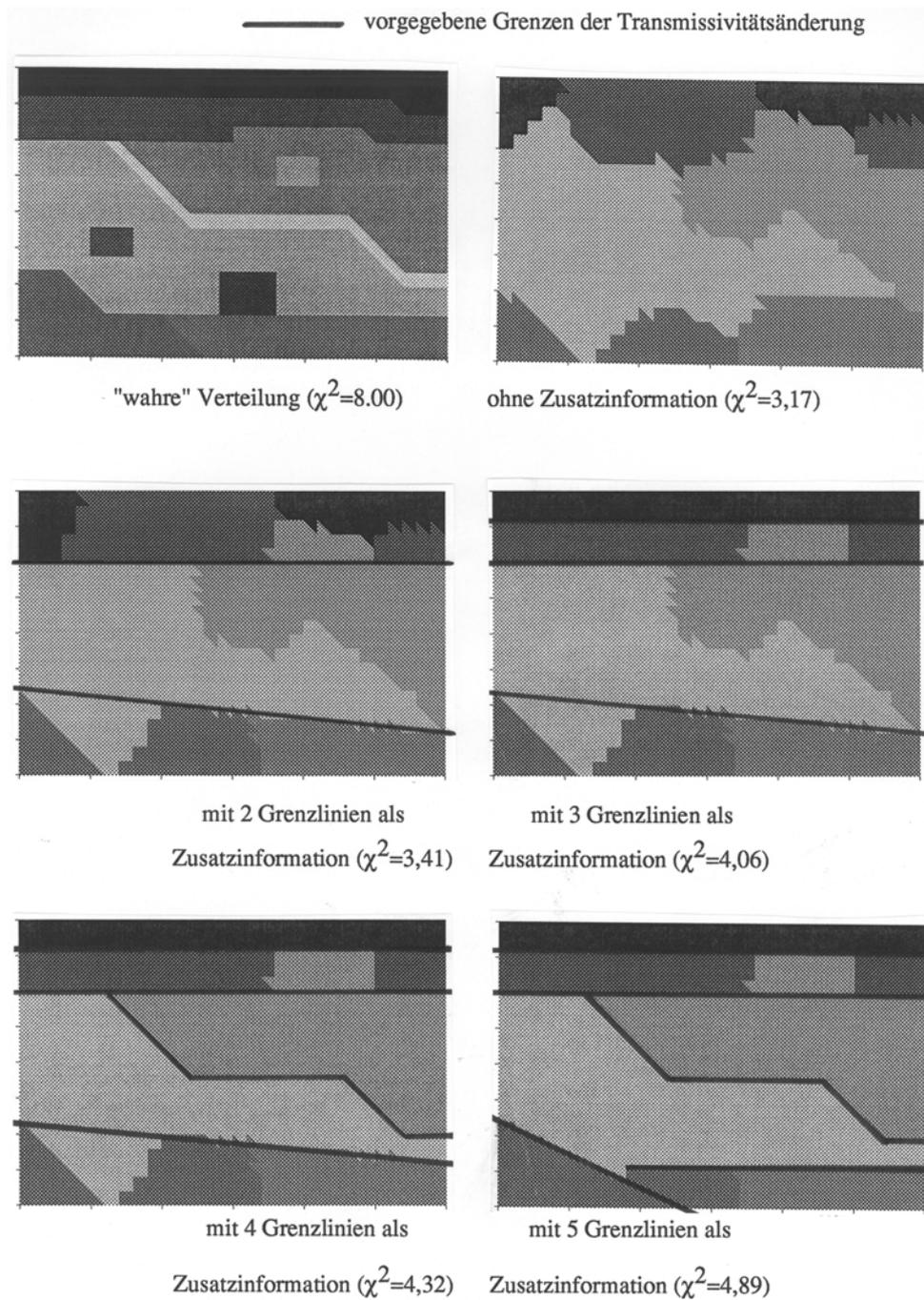
**Abb. 3:** Rasterdarstellung des Flurabstandes aus digitalem Höhenmodell und regionalisiertem Grundwasserspiegel (Reiter 2003)

## 2.2 Interpolation unter Verwendung von Hilfsvariablen

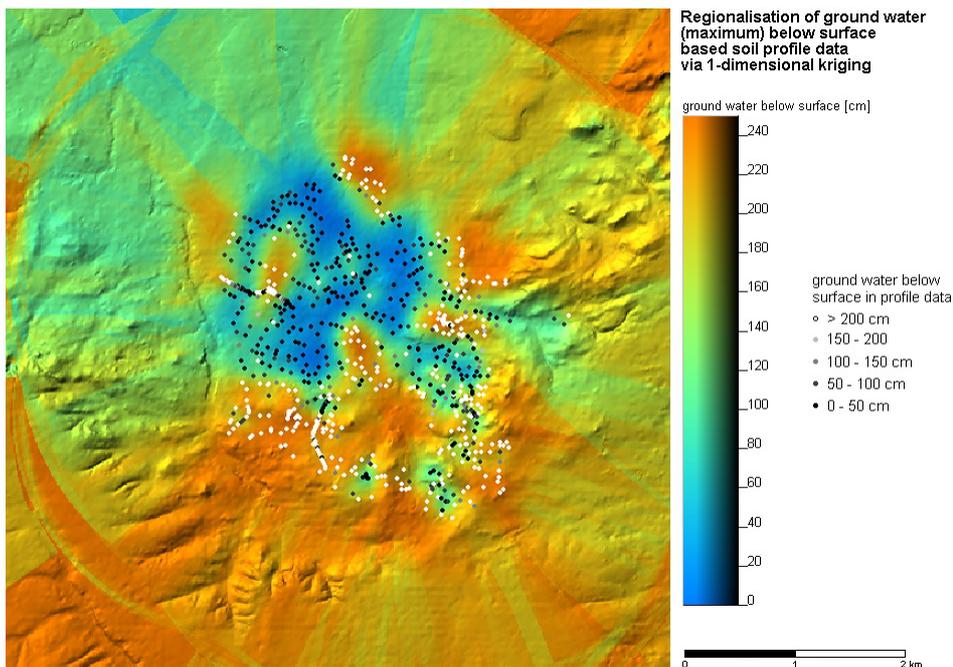
Bei grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen sind es häufig geologische, bodenkundliche oder geographische Zusatzinformationen, welche eine Regionalisierung mittels Interpolation verbessern sollen. Das folgende Beispiel zeigt, dass schon eine Information über geologische Unstetigkeiten im Aquifer, welche beispielsweise durch geophysikalische Messungen festgestellt werden kann, eine deutliche Verbesserung bei der Interpolation bewirken kann.

Als Beispiel dafür wurden aus einer bekannten (händisch konstruierten) Transmissivitätsverteilung (Abb. 4) zufällig 20 „Messpunkte“ gezogen und aus diesen „Messdaten“ eine Transmissivitätsverteilung mit Hilfe der Polygonmethode interpoliert (Abb. 5a). Für einen Vergleich der interpolierten und der „wahren“ Transmissivitätsverteilung wurde, auf Basis von Kontingenztafeln (Sachs, 1974), die Maßzahl  $\chi^2$  verwendet (Blaschke, 1990). Der Vergleich mit der „wahren“ Transmissivitätsverteilung ergibt ein  $\chi^2$ -Wert von 3,17 (eine völlige Übereinstimmung hätte einen  $\chi^2$ -Wert von 8). Führt man nunmehr die Information über geologisch begründete Grenzen (z.B. Materialwechsel) über die nicht hinweginterpoliert werden

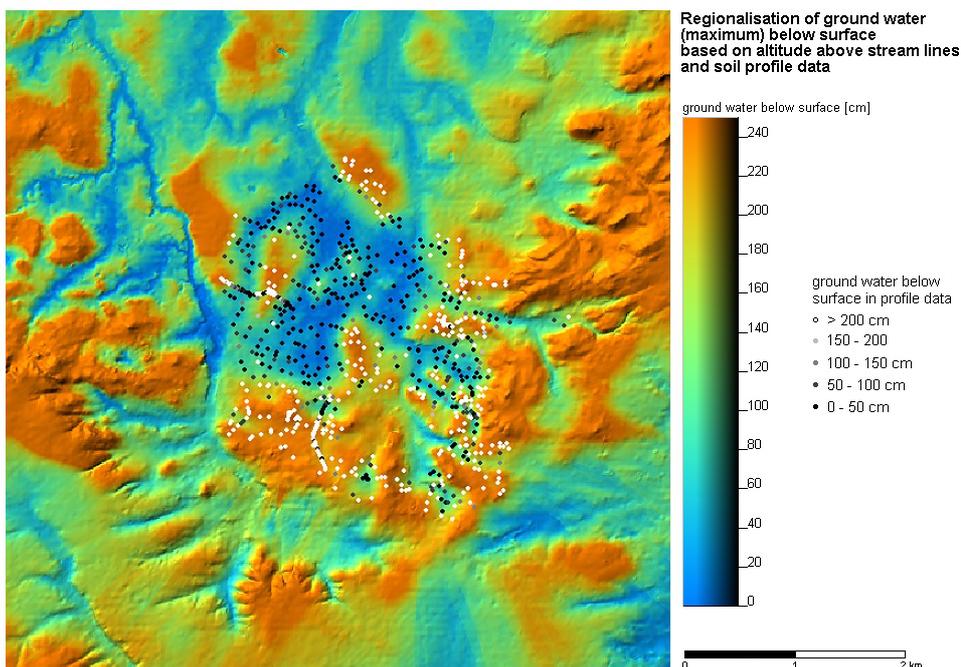
soll ein, dann zeigt sich eine deutliche Verbesserung des Interpolationsergebnisses (Abbildung 4 Mitte und Unten).



**Abb. 4:** Transmissivitätsverteilung: „wahre“ links oben; mit unterschiedlicher Intensität von Zusatzinformation interpolierte Transmissivitätsverteilungen (Blaschke, 1990)



**Abb. 5:** Ergebnis der Regionalisierung der Grundwasserhöchststände mit Ordinary Kriging (scilands GmbH Homepage)



**Abb. 6:** Ergebnis der Regionalisierung der Grundwasserhöchststände mit Kriging unter Einbeziehung von Zusatzinformation (Höhe über Tiefenlinie) (scilands GmbH Homepage)

Beim zweiten Beispiel kann anhand der Mitberücksichtigung des Reliefparameters "Höhe über Tiefenlinie", welcher aus einem DHM ermittelt wurde, die Regionalisierung des Grundwasserhöchststandes in einem Untersuchungsgebiet verbessert bzw. eine sinnvolle Extrapolation erst ermöglicht werden. Die Interpolation erfolgte in diesem Fall durch multidimensionales Kriging (Böhner und Köthe, 2003) 200

(Abb. 6), welches im Gegensatz zum Ordinary-Kriging (Abb. 5) als Zusatzinformation einen Flächendatensatz (hier "Höhe über Tiefenlinie") zur Schätzung der Grundwasserhöchststände zwischen den Punkten (Interpolation) bzw. jenseits der Punkte (Extrapolation) verwendet.

### **2.3 Grundwassermodelle**

Die Abschätzung der Auswirkungen zukünftiger Umweltveränderungen aufgrund einer Baumaßnahme gehört zu einer der häufigsten grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen. Der in diesen Fällen auch häufig enthaltene prognostische Teil in den Aussagen erfordert den Einsatz deterministisch-numerischer Simulationsmodelle zur räumlichen Beschreibung der hydrologischen Prozesse und Auswirkungen.

Für die Anwendung dieser Prozessmodelle sind eine Vielzahl von Parameter notwendig, welche teilweise flächendeckend für das gesamte Modellgebiet vorliegen müssen. In der Tabelle 1 (Kinzelbach 1987) sind die für eine Strömungsmodellierung notwendigen Parameter zusammen gestellt. Aus der Tabelle wird deutlich, dass für das Regionalisierungswerkzeug „Modell“ selbst eine Reihe von Regionalisierungen notwendig sind. Es sind in erster Linie die Aquiferparameter, welche meist durch geostatistische Methoden auf das gesamte Modellgebiet übertragen werden. Die Abb. 7 zeigt ein hydrogeologisches Modell und die daraus abgeleiteten Abstraktion der Untergrundverhältnisse als Basis für eine Grundwasser-modellerstellung.

Als Modellierungsergebnisse stehen regionale Aussagen über Grundwasserspiegelverhältnisse, -fließgeschwindigkeiten, -richtungen, -aufenthaltszeiten und bei der Anwendung von Stofftransportmodellen auch über die räumliche Verteilung von Stoffkonzentrationen zur Verfügung. Die Abb. 8 zeigt beispielhaft Modellergebnisse Konzentrationsverteilungen einer Stofftransportmodellierung für mehrer Zeitpunkte.

## **3. Zusammenfassung und Ausblick**

Bei grundwasserwirtschaftlichen Fragen kommen alle Instrumente der Regionalisierung zur Anwendung. Einerseits ist das Grundwasser direkt Ziel einer flächenhaften Interpretation von gemessenen Punktdaten hinsichtlich Quantität und Qualität der Grundwasserkörper. Andererseits sind es aber auch häufig die Kenngrößen des Grundwasserleiters und/oder der klimatischen Verhältnisse, welche als Grundlage für ein Verständnis eines Grundwassersystems in regionaler Form vorliegen müssen.

Eine Weiterentwicklung von Methoden, welche mehrere Kenngrößen in eine Regionalisierung einbeziehen, ist aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit solchen Verfahren (z.B. Cokriging) wünschenswert.

**Tab. 1:** Eingangsparameter für ein Grundwasserströmungsmodell (Kinzelbach, 1987)

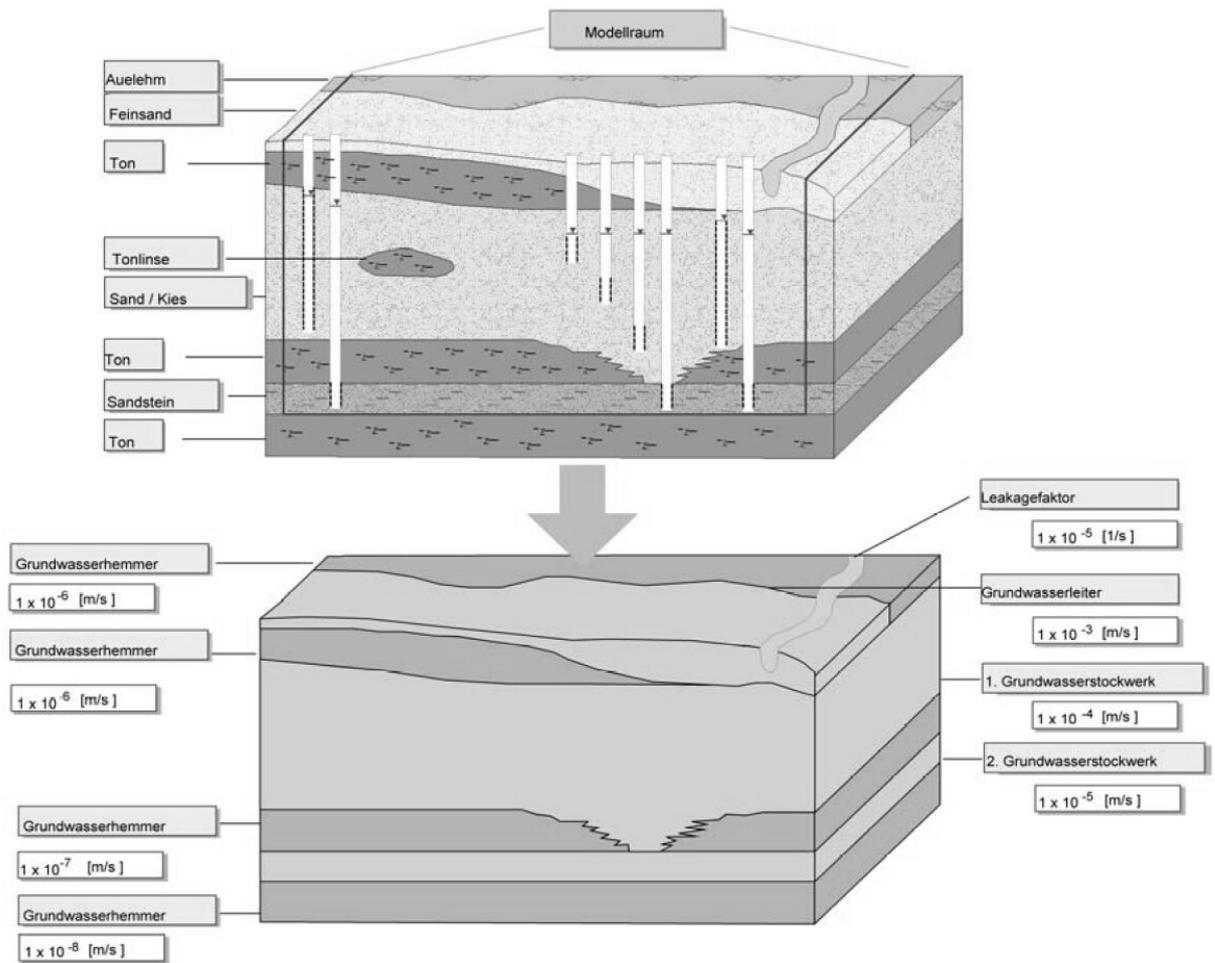
<b>Bezeichnung</b>	<b>Daten typ</b>	<b>Aquifer typ</b>	<b>Daten erhältlich</b>
<b>Aquiferdaten:</b>			
Stauerhöhe	r	f	aus der Geohydrologie
Durchlassigkeitsbeiwert	r	f	Pumpversuchsauswertungen
Transmissivität	r	g	Pumpversuchsauswertungen
Speicherkoeffizient	r	g	Pumpversuchsauswertungen
Effektive Porosität	r	f	Pumpversuchsauswertungen
<b>Hydrologische Daten:</b>			
Grundwasserneubildung durch Niederschlag	r,z	f,g	Klimadaten, Lysimeterdaten
Zugaben bzw. Entnahmen	r,z	f,g	Aufzeichnungen der Wasserwerke
Austausch mit Oberflächengewässern:			
Flußsohlenhöhe	r	f,g	topographische Karten
Wasserspiegelhöhe	r,z	f,g	Pegeldaten, Vermessungen, Spiegellagenberechnungen
Leakage-Faktoren	r	f,g	aus Rückrechnungen
<b>Randbedingungen:</b>			
Festpotentiale	r,z	f,g	Grundwassermessstellennetz
Randzuflüsse	r,z	f,g	ev. Aus Bilanzierungen, Abschätzungen der Hangzuflüsse in Talbecken
<b>Daten zur Eichung:</b>			
Piezometerhohen bzw. Grundwasserstände	r,z	f,g	Grundwassermessstellen
Oberflächenabflüsse	r,z	f,g	Abflussmessungen

r...räumliche Verteilung

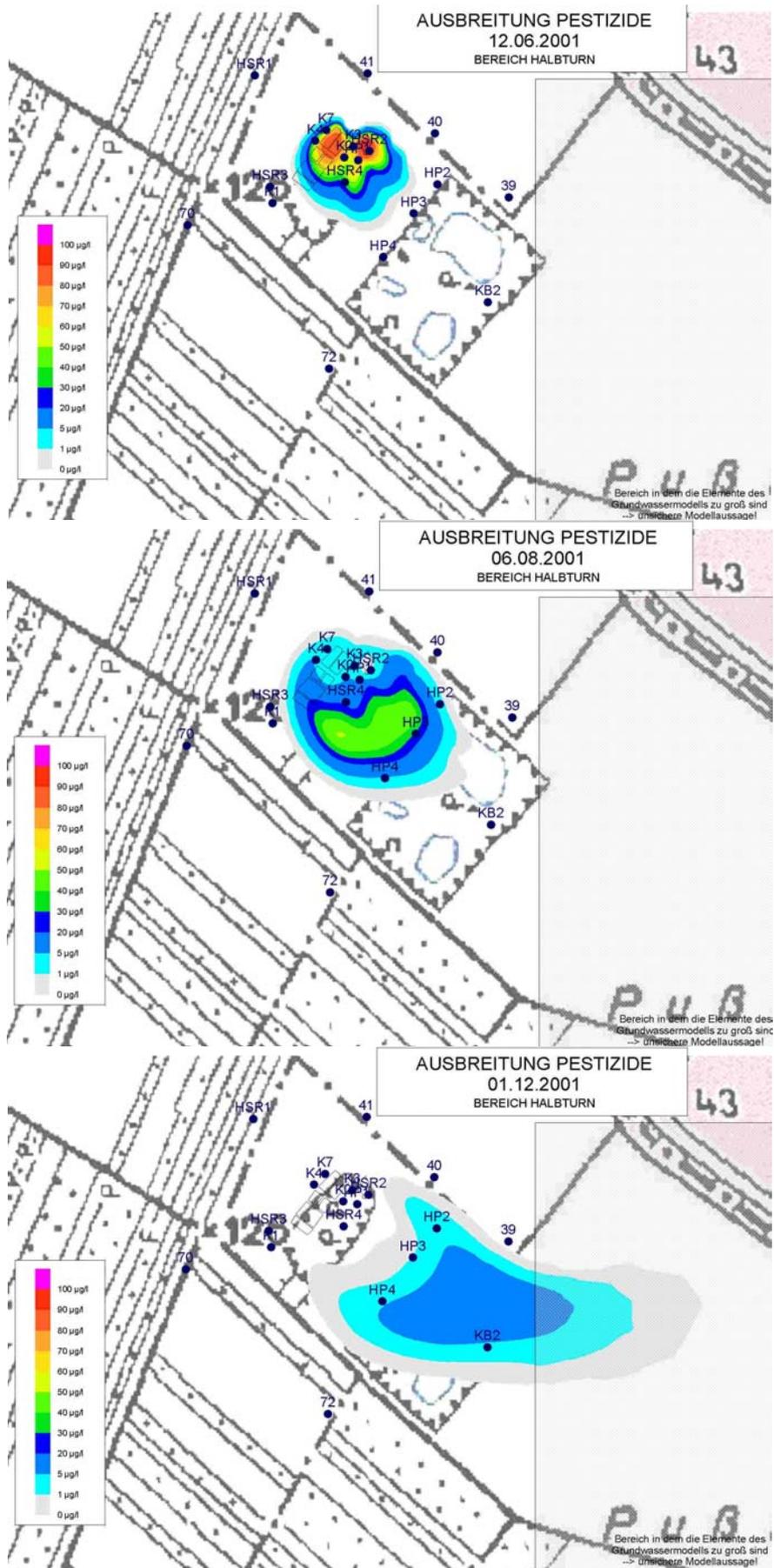
f...freier Aquifer

z...zeitliche Verteilung

g...gespannter Aquifer



**Abb. 7:** Beispiel für ein hydrogeologisches Modell als Basis für ein Grundwassermodell (Ritzler, 2003)



**Abb. 8:** Konzentrationsverteilungen als Ergebnis einer Grundwassermodellierung (Kroiss et. al, 2003)

#### 4. Literatur

- Blaschke A.P. (1990) Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Böhner, J. und Köthe, R. (2003) Bodenregionalisierung und Prozeßmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. - *Peterm. Geogr. Mitt.* (147), 3/2003: 72-82; Gotha.
- Godina R. und G. Blöschl (2006) Aufgaben und Methoden der Regionalisierung. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Technische Universität Wien, pp. 7-20.
- Grams (2000) Einsatz geostatistischer Verfahren zur Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich der Rieselfelder südlich Berlins. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Kinzelbach W. (1987) Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. Verlag Oldenburg, München.
- Kroiss, H., A.P. Blaschke, A. Farnleitner, D. Gutknecht, G. Kavka, R.L. Mach, B. Vogel, M. Zessner (2003) Auswirkungen der Versickerung von biologisch gereinigtem Abwasser auf das Grundwasser. Endbericht. Im Auftrag von BM für Wirtschaftl. Angelegenheiten, BM für Land- und Forstwirtschaft, BM für Wissenschaft und Verkehr, Österreichische Kommunal Kredit AG. Bund-Bundesländerkooperation - Bund-Land Burgenland.
- Reiter K. (2003) Flussbauliches Gesamtprojekt östlich von Wien – Variantenauswahl. Unveröffentlichtes Manuskript.
- Ritzler J. (2003) Hydrogeologie inklusive spezieller Probenahmetechniken. Symposium zum Bayerischen Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehung des natürliche Reinigungsvermögens“, Augsburg.
- Sachs L. (1974) Angewandte Statistik. Springer Verlag, Berlin.
- Scilands GmbH.homepage: <http://www.scilands.de>

#### **Anschrift des Verfassers:**

Dr. Alfred Paul Blaschke  
Technische Universität Wien  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Karlsplatz 13  
A-1040 Wien  
E-mail: [blaschke@hydro.tuwien.ac.at](mailto:blaschke@hydro.tuwien.ac.at)



## REGIONALISIERUNG VON GRUNDWASSERGÜTEPARAMETERN

Andreas Scheidleder, Johannes Grath, Claudia Schramm und Steffen Uhlig

### 1. Einleitung

Bei der Regionalisierung von Grundwassergütedaten werden Punktdaten in Flächeninformation transformiert. Diese Informationen dienen einerseits der visuellen Darstellung eines Zustands oder einer zeitlichen Entwicklung, dem Aufzeigen von Handlungsspielräumen und Handlungsbedarf sowie der Demonstration des Einhaltens oder Verfehlens gesetzlicher Normen und Ziele.

Welche Information dargestellt werden soll bzw. muss und wie sie am besten transportiert werden kann, um der Beantwortung der Fragestellung zu entsprechen, leitet sich einerseits von den gesetzlichen Erfordernissen und andererseits von den Erwartungen der Zielgruppe ab. Dies betrifft sowohl die Art und Komplexität der Darstellung als auch das Niveau der Aggregation.

Die Umwandlung der Daten in Information basiert letztendlich auf den genannten Rahmenbedingungen, die einerseits bereits in den gesetzlichen Grundlagen mehr oder weniger detailliert vorgegeben sein können bzw. von Experten entsprechend interpretiert werden müssen und umfasst einfache graphische Darstellungen bis hin zu hochkomplexen statistischen Bearbeitungen.

Die grundsätzliche Frage, was darzustellen bzw. zu demonstrieren ist, bildet gemeinsam mit dem konzeptionellen Verständnis des Grundwassersystems die Basis für das Messnetzdesign, das Probenahmedesign, die Analytik und die statistische Verarbeitung der Daten. Dieser Ablauf, basierend auf den wasserwirtschaftlichen Fragestellungen und den Erfordernissen für die Information an die Entscheidungsträger, die Öffentlichkeit und sonstige Zielgruppen ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann das konzeptionelle Modell verbessert und allenfalls das Monitoring Design adaptiert werden.

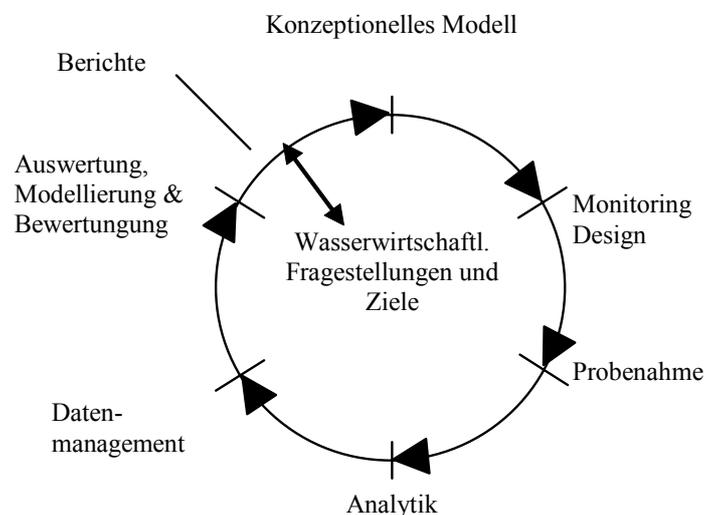


Abb. 1: Der Monitoring Zyklus (CIS WG C, 2006)

Grundwasserqualitätsinformationen werden auf verschiedenen Ebenen von unterschiedlichen Zielgruppen benötigt. Die unterschiedlichen Kombinationen von Informationsbedarf und Zielgruppe eröffnen ein breites Spektrum an Regionalisierungsmöglichkeiten und -notwendigkeiten. Besondere Betrachtung erfordern Aussagen, die für jene Bereiche getroffen werden müssen, für die eigentlich keine ausreichenden Datengrundlagen vorliegen. Unter Einbeziehung von Erfahrungen und Erkenntnissen aus ähnlichen Bereichen können Analogieschlüsse helfen, diese Wissenslücke zu überbrücken.

Nachfolgend soll am Beispiel unterschiedlicher Informationsbedürfnisse und gesetzlicher Vorgaben demonstriert werden, wie Grundwasserqualitätsparameter regionalisiert werden können und müssen und wie Aussagen in Gebieten getroffen werden können, wo keine gemessenen Daten vorliegen.

## **2. Beurteilung der Wassergüte in Österreich**

Das österreichische Wasserrechtsgesetz legt die grundsätzlichen Ziele für die Qualität des Grundwassers fest. Werden diese Ziel nicht erreicht, können bzw. müssen entsprechende gegensteuernde Maßnahmen ergriffen werden. Eine wesentliche Grundlage zur Bewertung bzw. Überprüfung, ob das Ziel, betreffend Zustand und Entwicklung der österreichischen Grundwasserqualität erreicht ist, stellt die Grundwasserschwellenwertverordnung (GSwV, BGBl. 502/1991 i.d.g. F.) dar. Die Grundlage für die Erhebung der Qualitätsdaten ist in der Wassergüte-Erhebungsverordnung (WGEV, BGBl. Nr. 338/91 i.d.g.F.) festgelegt auf deren Basis seit 1991 Qualitätsdaten in Österreich erhoben werden.

Die GSwV legt fest, dass die Bewertung der Grundwasserqualität auf Basis von Grundwassergebieten zu erfolgen hat. Die Abgrenzung dieser Gebiete erfolgte anhand von (hydro)geologischen und administrativen Kriterien. Mit Stand 2006 werden in Österreich 158 Grundwassergebiete beobachtet und bewertet. Die beobachteten Quellen werden sog. Gebirgsgruppen zugeordnet. Der Zustand dieser Grundwässer wird mit rd. 2.000 Grundwassermessstellen erfasst, die grundsätzlich vier Mal jährlich beprobt werden.

Entsprechend den Vorgaben der GSwV ist für jedes Grundwassergebiet der Zustand festzustellen, wobei die Regionalisierungskriterien wie folgt dargelegt sind:

- Für jede Messstelle wird über den Beurteilungszeitraum von 2 Jahren ein arithmetischer Mittelwert eines Grundwasserinhaltsstoffs errechnet.
- Eine Messstelle wird als ‚gefährdet‘ eingestuft wenn der arithmetische Mittelwert der Messstelle den zugehörigen Schwellenwert überschreitet. Auszunehmen davon sind Messstellen mit geogener oder sonstiger natürlicher Hintergrundbelastung durch diesen Grundwasserinhaltsstoff.
- Ein Grundwassergebiet wird als ‚Beobachtungsgebiet‘ bezeichnet, wenn mindestens 30 % aller Messstellen dieses Gebietes als ‚gefährdet‘ eingestuft sind.

- Ein Grundwassergebiet wird als ‚voraussichtliches Maßnahmenggebiet‘ bezeichnet, wenn mindestens 50 % aller Messstellen dieses Gebietes als ‚gefährdet‘ eingestuft sind.

Zusätzlich ist zu beachten, dass die Auswertung nur vorgenommen werden darf, wenn mindestens 5 Beprobungen an jeder Messstelle vorliegen.

Die Visualisierung der Informationen und Ergebnisse erfolgt regelmäßig im Bericht zur „Wassergüte in Österreich“ (BMLFUW/Umweltbundesamt, 2005) in Form von Karten sowohl auf der Ebene der Grundwassergebiete als auch auf Ebene der Messstellen.

Die Ergebnisse auf der Ebene der Grundwassergebiete zeigt Abbildung 2, die einen raschen Überblick über den Gesamtzustand des Grundwassers durch die Kennzeichnung von Grundwassergebieten als Beobachtungs- und voraussichtlichen Maßnahmenggebiete erlaubt, wobei hierbei die Auswertungen für die Parameter Nitrat, Nitrit, Ammonium, Orthophosphat, Chlorid, Natrium, Kalium, Atrazin, Desethylatrazin und Bentazon zusammengefasst dargestellt werden.

Eine Darstellung der Grundwasserqualitätssituation auf Messstellenebene gibt Abbildung 3, wo die Visualisierung der mittleren klassifizierten Konzentrationsgehalte eines Parameters je Messstelle eine detailliertere räumliche Betrachtung erlaubt.

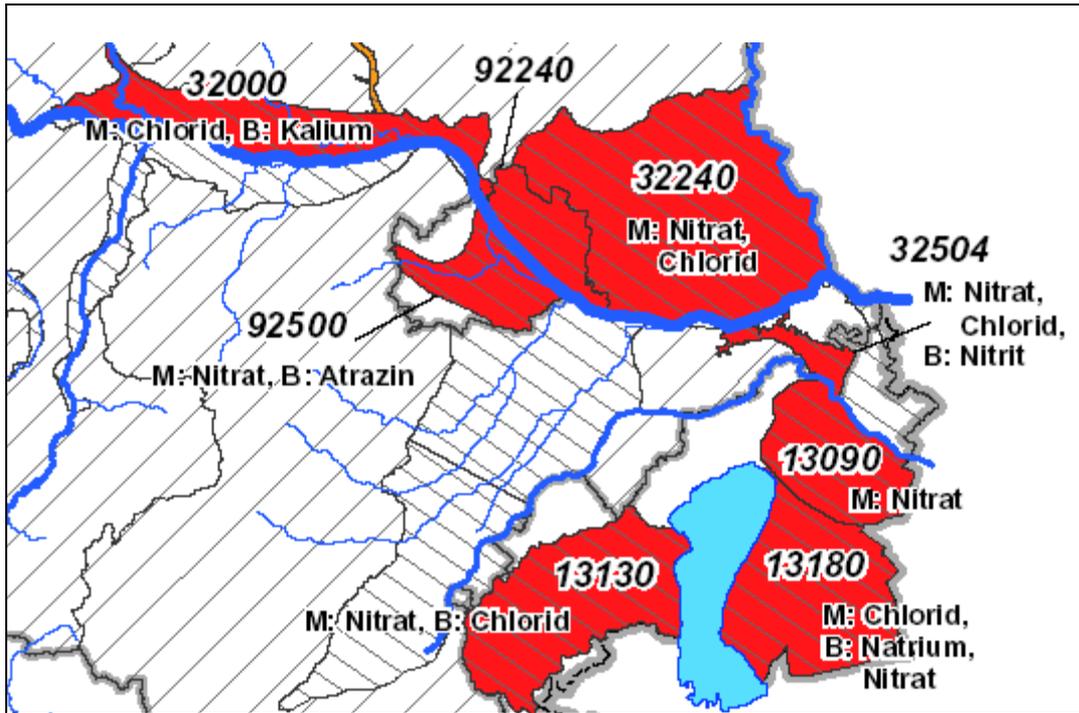
Eine derartige Darstellung kann als Basis für die Erstellung bzw. einer schrittweisen Verbesserung des konzeptionellen Verständnisses im Grundwassergebiete dienen sowie zur Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen und der Umsetzung von Maßnahmen.

### **3. Grundwasserstatistik Projekt – [www.wfdgw.net](http://www.wfdgw.net)**

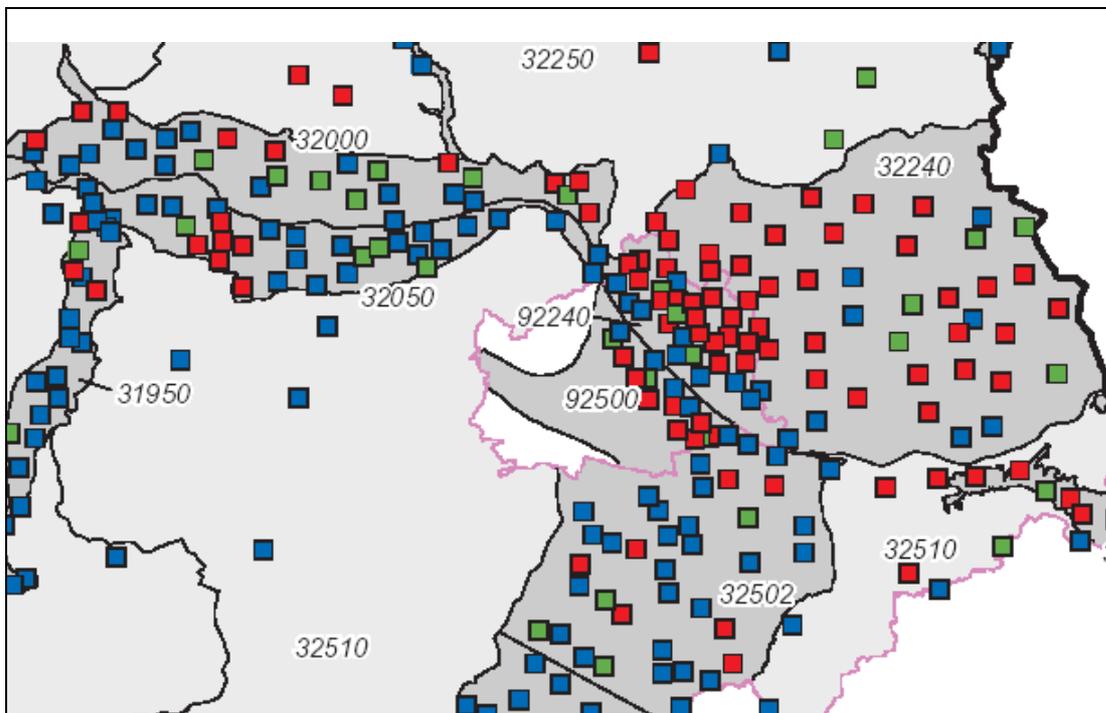
Die Betrachtungs- und Beurteilungseinheit der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) für Belange des Grundwassers ist der Grundwasserkörper. Der Grundwasserkörper wird als Managementeinheit innerhalb eines Flusseinzugsgebietes definiert.

Bis spätestens 2015 muss der gute Zustand des Grundwassers erreicht werden. Eine Verschlechterung des Zustands aller Grundwasserkörper ist zu verhindern. Darüber hinaus sind signifikante und anhaltende steigende Trends aufgrund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umzukehren (Europäische Kommission, 2005).

Die Erreichung dieser Ziele ist entsprechend nachzuweisen. Die Richtlinie verlangt, dass die Grundwassergütedaten in geeigneter Form zuerst auf Messstellenebene aggregiert werden, um den chemischen Zustand des Grundwassers nach den Vorgaben der Richtlinie entsprechend bestimmen zu können. Darüber hinaus soll mit diesen Daten der statistische Nachweis eines steigenden Trends und einer Trendumkehr möglich sein.



**Abb. 2:** Beobachtungsgebiete und voraussichtliche Maßnahmengemeiten gem. GSwV im Beobachtungszeitraum (2001–2002) für zusammenhängende Grundwassergebiete. Ausschnitt. (Umweltbundesamt, 2004)



**Abb. 3:** Mittlere Nitratgehalte im Beobachtungszeitraum (2001–2002) der Messstellen, eingeteilt in Konzentrationsklassen. Ausschnitt. (BMLFUW/Umweltbundesamt, 2005)

Bereits im Jahr 1999 hat die Europäische Kommission ein Forschungsprojekt initiiert, das zum Ziel hatte, Methoden für die Datenaggregation und Methoden für die Ermittlung von Trends bzw. von Trendumkehr auf Ebene von Grundwasserkörpern zu erarbeiten. Dieses sogenannte „Grundwasserstatistik Projekt“ wurde unter der Leitung des Umweltbundesamtes mit Partnern aus insgesamt 11 Europäischen Ländern durchgeführt. Im Rahmen der Arbeiten erfolgte zunächst die Erhebung der Methoden, in den einzelnen Ländern bereits in Anwendung waren (siehe Kapitel 3.1). Darauf aufbauend wurden verschiedene statistische Methoden diskutiert, beschrieben und getestet sowie geeignete Methoden für Aggregation, Trend- und Trendumkehrermittlung vorgeschlagen. (siehe Kapitel 3.2). Die gesamten Ergebnisse sind unter [www.wfdgw.net](http://www.wfdgw.net) dargestellt bzw. als „Technical Report Nr. 1: The EU Water Framework Directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results“ von der Europäischen Kommission veröffentlicht (Europäische Kommission, 2001).

Die Erfordernisse an die gesuchte Methode waren klar umrissen. Die Methodik musste:

- statistisch korrekt und
- pragmatisch sein.
- Sie sollte Schadstoffkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze sowie
- ungleichmäßig verteilte Konzentrationen innerhalb eines Grundwasserkörpers berücksichtigen.
- Europaweit anwendbar, unter Berücksichtigung der Vielfalt an Grundwasserkörpern (hydrogeologische Charakteristik, Größe, Nutzungen, Messnetz etc.), sowie
- anwendbar für alle Arten von Parametern und
- auf die Vorgaben der WRRL abgestimmt sein.

### **3.1 Übersicht über international verwendete Methoden zur Regionalisierung**

In den europäischen Mitgliedsstaaten erfolgt die Regionalisierung bzw. Aggregation von Grundwassergüteparametern zur Beurteilung des chemischen Zustands auf die Ebene von Grundwasserkörpern auf unterschiedliche Weisen. Folgende Methoden konnten im Rahmen der Inventur zum Grundwasserstatistik Projekt ([www.wfdgw.net](http://www.wfdgw.net)) zusammengefasst werden:

- Median: Dänemark, Großbritannien, Österreich und Portugal;
- Arithmetisches Mittel (teilweise mit Vertrauensbereich): Niederland, Österreich und Spanien;
- Mittelwert basierend auf der log-normal Verteilung (mit Vertrauensbereich): Belgien;
- Prozentueller Anteil von Messstellen mit guter Qualität (teilweise mit Toleranzbereich): Deutschland und Niederlande;

Minimum und Maximum in einem Grundwasserkörper werden von allen Ländern als Zusatzinformation berücksichtigt jedoch nicht als alleinige Parameter herangezogen, um den Zustand des Grundwasserkörpers zu beurteilen.

Die verschiedenen Methoden sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft unterschiedlich leistungsfähig. Beispielsweise wird die Variabilität der Daten sowohl über die Zeit als auch über die Fläche unterschiedlich stark berücksichtigt. Die Wahl der Methode leitet sich von Fall zu Fall von den Zielen des Monitorings ab.

### **3.2 Diskutierte Methoden zur Umsetzung der WRRL**

Damit in Übereinstimmung mit den Erfordernissen der WRRL eine statistisch fehlerfreie Datenaggregation garantiert werden kann, wurde von der Arbeitsgruppe des Grundwasserstatistik Projekts als Vorbedingung definiert, dass für homogene Grundwasserkörper (hinsichtlich hydrogeologischem Aufbau und Verteilung der Belastungen) die Homogenität des Messnetzes im Sinne einer räumlichen Repräsentativität gegeben sein muss. Bei heterogenen Grundwasserkörpern sollte das Messnetz die hydrogeologischen Gegebenheiten entsprechend repräsentieren. Zur Beurteilung der Homogenität eines Messnetzes wurden insgesamt fünf Methoden untersucht. Die Messstellen sollten gleichmäßig über den Grundwasserkörper verteilt sein, es sollte zu keiner Anhäufung von Messstellen kommen und jede Messstelle sollte einen ähnlich großen Anteil im Grundwasserkörper repräsentieren.

Zur Ausarbeitung eines geeigneten Aggregierungsalgorithmus für die Zustand- und Trendbestimmung wurden insgesamt sieben etablierte statistische Methoden für die gebietsweise Datenaggregation auf ihre Eigenschaften und ihre Eignung für die Zwecke der WRRL getestet. Basis für die räumliche Aggregation ist das arithmetische Mittel je Messstelle, wie in der WRRL vorgegeben. Die Trendbeurteilung sollte jedenfalls auf den Methoden der Datenaggregation zur Zustandsbeurteilung aufbauen. Folgende Methoden der Datenaggregation wurden untersucht:

- Quantilen (Median, 70 % Perzentile)
- Arithmetisches Mittel und Konfidenzbereich
- Gewichtetes arithmetisches Mittel und Konfidenzbereich
- Kriging Mittelwert und Konfidenzbereich (auch 70 % Perzentil)
- Maximum likelihood Ansatz basierend auf der zensierten Log-Normal-Verteilung (Mittelwert und 70 % Perzentil)
- Prozentsatz von Messstellen mit guter Qualität
- Minimum, Maximum

Die verschiedenen Methoden wurden analysiert, in ein Auswertetool integriert und mithilfe von Testdaten, die von den Partnern zur Verfügung gestellt wurden, auf ihre Eignung getestet inwieweit sie die Erfordernisse erfüllen.

### 3.3 Vorgeschlagene Methoden zur Umsetzung der WRRL

Nach eingehenden Tests der diskutierten Methoden mit den verfügbaren Testdaten einigte sich die Arbeitsgruppe auf folgende Empfehlung:

Zur Berechnung eines Gebietsmittelwertes wurde eine pragmatische Methode erarbeitet und vorgeschlagen. Im Prinzip handelt es sich dabei um das arithmetische Mittel (AM) und dessen 95 % Vertrauensgrenze ( $CL_{AM}$  = confidence limit). Sollte unter bestimmten Bedingungen (unterschiedliche Messstellendichte in Teilgebieten, Grundwasserkörper-Charakteristik etc.) die Berechnung des Gebietsmittelwertes mit dem AM statistisch nicht zulässig sein, wird vorgeschlagen, die Berechnung eines gewichteten arithmetischen Mittels ( $wAM$  = weighted AM) und dessen Vertrauensgrenze ( $CL_{wAM}$ ) unter Berücksichtigung verschiedener Teil-Grundwasserkörper durchzuführen. Im Falle einer Grenzwertüberschreitung durch die Vertrauensgrenze  $CL_{wAM}$  ist es gestattet, diese Ergebnisse mit einer neuerlichen Berechnung des Mittelwerts und dessen Vertrauensgrenze zu überprüfen, wobei in diesem Fall jede einzelne Messstelle mit jenem Flächenanteil gewichtet wird, den sie repräsentiert (= Kriging-Mittelwert [KM], Vertrauensgrenze [ $CL_{KM}$ ])

Um auch bei Grundwasserkörpern mit sehr wenigen Messstellen eine ausreichend zuverlässige Schätzung gewährleisten zu können, wird vorgeschlagen, die obere Vertrauensgrenze (mit einem Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$ ) des (gewichteten) arithmetischen Mittels (bzw. den Kriging-Mittelwert) heranzuziehen anstatt den arithmetischen Mittelwert selbst. Der obere Vertrauensbereich hängt ab von der Variabilität des Konzentrationsniveaus innerhalb eines Grundwasserkörpers und der Anzahl der Messstellen. Das CL sinkt mit steigender Messstellenanzahl bzw. mit einer sinkenden Variabilität des Konzentrationsniveaus. Die Anwendung des CL erlaubt die Reduzierung von Messstellen in Grundwasserkörpern, bei denen das Konzentrationsniveau weit unterhalb eines Grenzwertes liegt, und legt die Verdichtung des Messnetzes in jenen Grundwasserkörpern nahe, die Konzentrationen nahe des Grenzwertes aufweisen.

Wenn ein Grundwasserkörper in mehrere homogene Teil-Grundwasserkörper geteilt werden kann, soll das gewichtete arithmetische Mittel ( $wAM$ ) unter Berücksichtigung der flächenmäßigen Anteile der Teil-Grundwasserkörper und der jeweiligen AM berechnet werden.

Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Berechnung des Gebietsmittelwertes mit Hilfe der Kriging-Methode keiner Modellierung der regionalen Konzentrationsniveaus von Schadstoffen im Grundwasserkörper entspricht und die Ergebnisse daher nicht als solche gesehen werden dürfen. Die Kriging-Methode wird ausschließlich zur Korrektur einer ungleichen Messstellenverteilung angewendet, also nicht um innerhalb eines Grundwasserkörpers regionalisierte Konzentrationsniveaus abzuschätzen und diese in einer Karte darzustellen.

### **3.4 Ausblick Grundwasser-Tochterraichtlinie**

Die WRRL sieht vor, dass detaillierte Vorgaben zur Beurteilung des Zustands der Grundwasserqualität in der sogenannten Grundwasser-Tochterraichtlinie festgelegt werden. Diese Richtlinie liegt derzeit im Entwurf vor. Sobald sie vom Parlament verabschiedet ist, wird sich eine europäische Arbeitsgruppe damit befassen, basierend auf den vorliegenden Arbeiten, die gesetzlichen Vorgaben in Form eines Leitfadens zu präzisieren. Sollte die Tochterraichtlinie nicht zustande kommen, so obliegt es den Mitgliedsstaaten geeignete Methoden auf nationaler Ebene anzuwenden.

## **4. Ausgewählte Beispiele bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Österreich**

Die Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie sind im österreichischen Recht im Wasserrechtsgesetz implementiert. Verschiedene detaillierte Vorgaben wurden bzw. werden noch im Wege von Verordnungen erlassen.

Die Umsetzung der WRRL erfordert eine schrittweise Vorgehensweise, wobei die Abgrenzung und Beschreibung von Grundwasserkörpern sowie die Beurteilung des Risikos, die Ziele der Richtlinie bis 2015 nicht zu erreichen, bereits zu erledigen waren. Die nachfolgend beschriebenen Aktivitäten tragen mittelbar oder unmittelbar zur Umsetzung der WRRL bei.

### **4.1 IST-Bestandsaufnahme**

Im Zuge der Umsetzung der WRRL war bis Ende 2005 eine Beurteilung erforderlich, für welche Grundwasserkörper ein Risiko besteht, dass sie im Jahr 2015 die Ziele der WRRL eines guten chemischen Zustandes nicht erreichen (IST-Bestandsaufnahme).

Diese IST-Bestandsaufnahme entsprechend WRRL erfolgte in Österreich für die Beurteilung der Grundwasserqualität auf Basis gemessener Daten. Mangels Vorgaben in der WRRL wurde diese Beurteilung anhand der Kriterien und der Methodik der GSwV, wie bereits im vorangegangenen Kapitel 2 erläutert, durchgeführt.

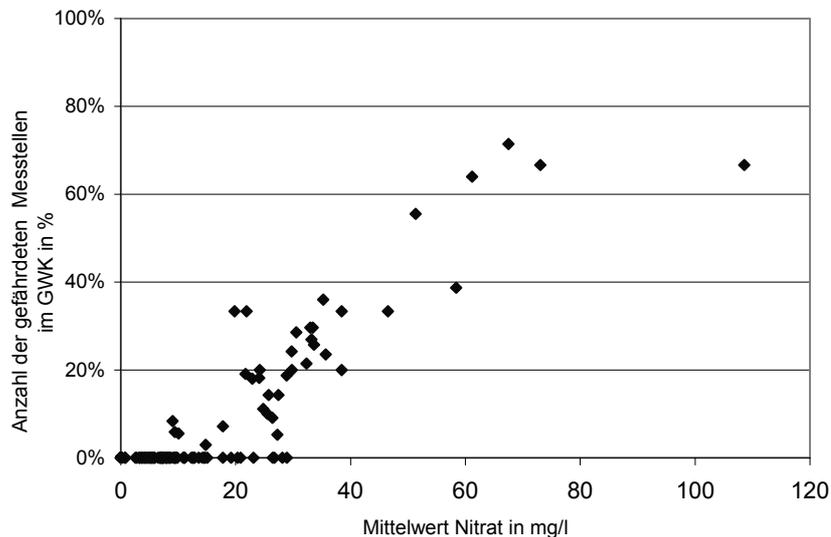
Eine besondere Herausforderung bestand jedoch darin, dass im Gegensatz zur WGEV-basierten Abgrenzung von Grundwassergebieten nun infolge der Erfordernisse der WRRL eine flächendeckende Abgrenzung von Grundwasserkörpern erfolgte. Nicht für alle neu abgegrenzten Grundwasserkörper lagen somit Messdaten vor und auch die vorliegenden Messreihen erfüllten vielerorts nicht die entsprechenden Kriterien der GSwV zur Beurteilung des Zustandes (mindestens 5 Beprobungen je Messstelle und Beurteilungszeitraum).

Eine Beurteilung des Risikos musste dennoch getroffen werden, wofür ein statistisches Modell entwickelt wurde, anhand dessen mittels Analogieschlüssen das Konzentrationsniveau der erforderlichen Grundwassergüteparameter von Einflussfaktoren abgeleitet wurde. Dieses Modell ergänzte gleichsam jene Bereiche in denen es zu einer Nicht-Anwendbarkeit der Zustandsbeurteilung gemäß GSwV kam,

also für jene Grundwassergebiete in denen zu wenig oder in Einzelfällen keine Messstellen bzw. Daten verfügbar waren.

Ein wesentlicher Teil dieses Modells umfasste die Regionalisierung (Aggregation) von Einflussfaktoren unterschiedlichster Ebenen (Grundwasserkörper-, Gemeinde- oder Messstellen-Ebene) auf die einheitliche Ebene der Grundwasserkörper um zu einer regionalisierten Risikoaussage für den einzelnen Grundwasserkörper zu gelangen. Mehr als 150 Einfluss- und Risikofaktoren wurden in die Untersuchung einbezogen.

Da zwischen dem Anteil gefährdeter Messstellen je Grundwassergebiet (entsprechend GSwV) und dem jeweiligen arithmetischen Mittel über das Gebiet ein gut ausgeprägter linearer Zusammenhang besteht und sich das arithmetische Mittel für statistische Abschätzungen gut eignet, wurde das statistische Modell (gewichtetes multifaktorielles Quotientenmodell) zur Risikoabschätzung auf Basis der Mittelwerte der Grundwasserkörper angewendet.



**Abb. 4:** Beziehung zwischen Grundwasserkörper-Mittelwert und Anteil gefährdeter Messstellen im Grundwasserkörper (in %) für Nitrat

Die für die verschiedenen Parameter ausgearbeiteten Modelle lassen sich unmittelbar zur Prognose des mittleren Konzentrationsniveaus in einem Grundwasserkörper heranziehen. Gleichwohl ist – bei einem dichten, repräsentativen Messnetz – dem gemessenen Mittelwert in der Regel der Vorzug gegenüber einem Modellwert zu geben, denn Fehler sowohl im Modell als auch in der zugrunde liegenden Datenbasis sind nie ganz zu vermeiden. Andererseits ist auch bei einem gemessenen Mittelwert selbst bei einem repräsentativen Messnetz zumindest von einem zufälligen Fehler auszugehen, so dass unter Umständen auch eine Kombination von Modellmittelwert und Messwertmittelwert sinnvoll sein kann. So bietet es sich bei geringer Anzahl von Messstellen oder bei nicht ausreichend repräsentativen Messnetzen an, die genannten Mittelwerte in geeigneter Weise (eventuell gewichtet) zu mitteln, um eine möglichst genaue Schätzung des Konzentrationsniveaus zu gewinnen.

Die im Rahmen des Quotientenmodells erfassten Faktoren sind zunächst als Risikoindikatoren zu interpretieren. Dies bedeutet noch nicht, dass nach Reduzierung eines Risikoindikators automatisch mit einer Reduzierung der Grundwasserbelastung zu rechnen ist. Vielmehr ist nicht auszuschließen, dass der Risikoindikator mit der tatsächlichen Ursache für die Grundwasserbelastung nur hoch korreliert ist - nach einer Reduzierung des Risikoindikators wäre dann unter Umständen die Korrelation dieses Indikators mit der tatsächlichen Ursache für die Grundwasserbelastung nicht mehr gegeben. Ob also ein Risikoindikator tatsächlich ein Risikofaktor ist, kann nur anhand von fachlichen Überlegungen überprüft werden. Wenn jedoch eine klare Verbindung zwischen Risikoindikator und den zugehörigen Belastungsursachen vorliegt, kann dieser Risikoindikator auch zur Festlegung von Maßnahmen zur Belastungsreduzierung verwendet werden.

Liegt keine klare Verbindung zwischen Risikoindikator und Belastungsursache vor, können dennoch die im Modell ermittelten Risikoindikatoren zur Abschätzung der Grundwasserbelastung herangezogen werden. Dies gilt auch bei einer Betrachtung zeitlicher Trends: Ebenso wie die Messstellenmittelwerte können auch die berechneten Effekte der Risikoindikatoren zur Trendabschätzung verwendet werden. Eine solche Analyse kann einerseits verwendet werden, um bessere Einblicke in die tatsächlichen Ursachen der Grundwasserbelastung zu erhalten, andererseits gestattet sie eine sehr präzise Prognose der weiteren Entwicklung.

## **4.2 Hydrochemische Karte**

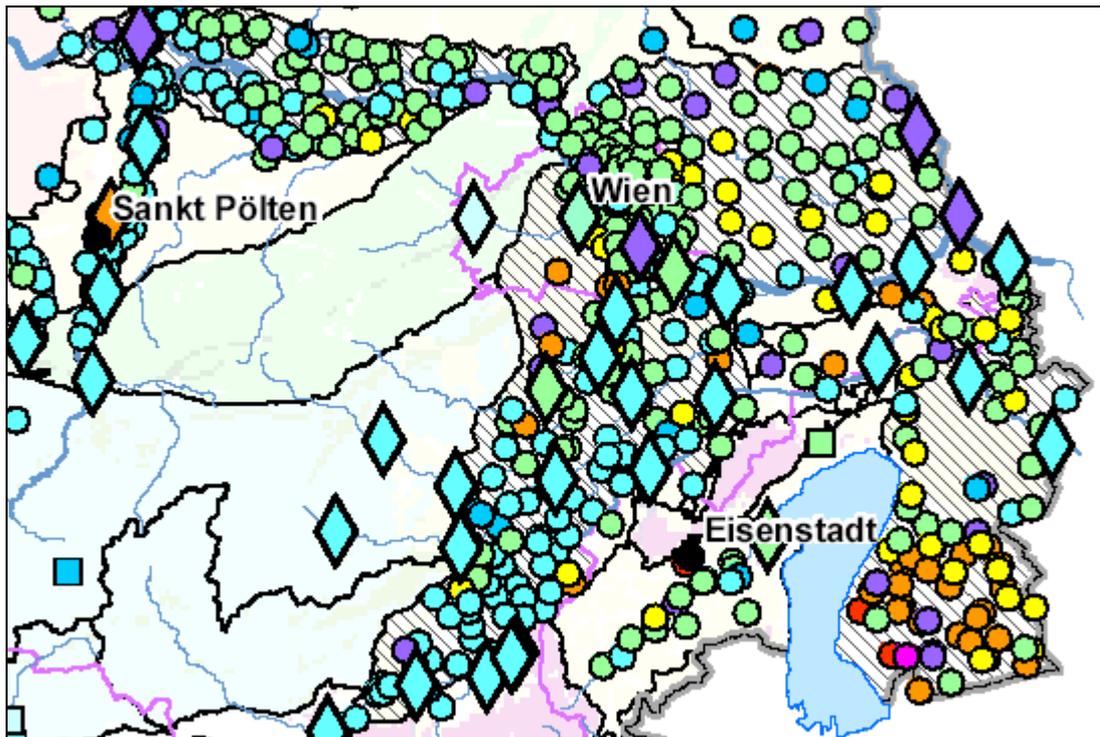
Der geochemische Gesteinshintergrund beeinflusst die Eigenschaften des Wassers, als wohl bekanntestes Beispiel dafür ist die Wasserhärte zu nennen. Das Umweltbundesamt erstellte in Kooperation mit dem Lebensministerium und basierend auf den Daten der österreichischen Wassergüteerhebung eine hydrochemische Karte (Kralik et al., 2005), die in eindrucksvoller Weise zeigt, wie die geologischen Einheiten Österreichs im Wasserchemismus abgebildet werden. Gleichzeitig werden aber auch anthropogene Einflüsse ersichtlich.

Grundlegende Idee für eine Klassifizierung der Wasserchemie in Österreich war die Überprüfung der Abgrenzung der Grundwasserkörper im Zuge der Umsetzung der WRRL.

Die hydrochemische Verteilung der Elemente (hydrochemische Fazies) zeigt zusammen mit der Mineralisierung der Wässer eine Abfolge von Reaktionen mit den Gesteinen an und ist ein Indikator für die Richtung des Grundwasserstromes.

Mit Hilfe der Darstellung des Wasserchemismus durch das international gebräuchliche trilineare Diagramm nach Piper wurden Wassertypen nach Furtak und Langguth in Äquivalent-% mit kleineren Modifikationen abgegrenzt.

Demnach können in den österreichischen Grundwasserleitern sieben Wassertypen unterschieden werden, denen die einzelnen Messstellen zugeordnet wurden. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus der Hydrochemischen Karte Österreichs.



**Abb. 5:** Ausschnitt aus der Hydrochemischen Karte Österreich. (Kralik et al., 2005)

Als beispielhaftes Ergebnis der Analyse zeigte sich, dass, wenn man den Nitratgehalt der Wässer in Relation zur gesamten Ionensumme setzt, mit zunehmender Gesamtionensumme auch die Nitratwerte ansteigen. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Mineralisierung die Nitratgehalte im Wasser nicht nur durch menschlichen Einfluss sondern auch durch den natürlichen Hintergrund erhöht werden.

Die Ergebnisse dieser Karte tragen zu einem besseren konzeptionellen Verständnis der Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Grundwasser beträchtlich bei und können eine differenzierte und zielgerichtete Vorgangsweise bei der Umsetzung von Maßnahmen unterstützen.

### 4.3 Geogene Hintergrundwerte oberflächennaher Grundwasserkörper

Die WRRL sowie die künftige Grundwasser-Tochterraichtlinie sehen die Festlegung von nationalen Hintergrundwerten vor. Diese Hintergrundwerte sind notwendig, um die Beiträge aus den menschlichen Tätigkeiten abgrenzen zu können. Dies soll insbesondere bei der Bewertung des Zustandes berücksichtigt werden (BRIDGE, 2006). Im Rahmen eines Projektes der Geologischen Bundesanstalt im Auftrag des Lebensministeriums wurden erstmals flächendeckend für Österreich hydrochemische Hintergrundwert für eine Reihe von Grundwasserqualitätsparametern in allen oberflächennahen Grundwasserkörpern abgeleitet (Hobiger & Klein, 2004). Der ermittelte Hintergrundwert ist dabei ein auf den einzelnen Grundwasserkörper regionalisierter Wert für einen Grundwassergüteparameter.

In die Analyse flossen eine Vielzahl vorhandener hydrochemischer und geochemischer Daten aus Forschungs- und Beobachtungsprogrammen des Bundes und der Bundesländer ein sowie zusätzliche Hilfsdaten wie Corine-Landcover und geologische Karten.

Sämtliche hydrochemischen Daten wurden einheitlich parametrisiert und zur Regionalisierung und Visualisierung in einer GIS-fähigen Datenbank zusammengeführt. Die Ableitung konkreter Hintergrundwerte erfolgte über kombinierte geostatistische, hydrogeologische und hydrochemische Interpretationsschritte. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden in Form von Karten dargestellt.

Zu Beginn der Untersuchung stand eine gründliche Analyse der vorhandenen Daten hinsichtlich Plausibilität und Brauchbarkeit denn die Daten wurden ja auf Basis der individuellen Zielsetzungen dieser unterschiedlichsten Projekte maßgeschneidert generiert. Nicht immer waren die Daten auch für die Zwecke dieser Studie geeignet. Aus der verbleibenden Datenmenge wurden zuerst jene Datensätze extrahiert, die nicht anthropogen beeinflusst waren. Unterstützend dazu wurden unter anderem Hauptkomponentenanalysen durchgeführt, um über die räumliche Verteilung errechneter Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Parametern anthropogene Einflüsse erkennen zu können.

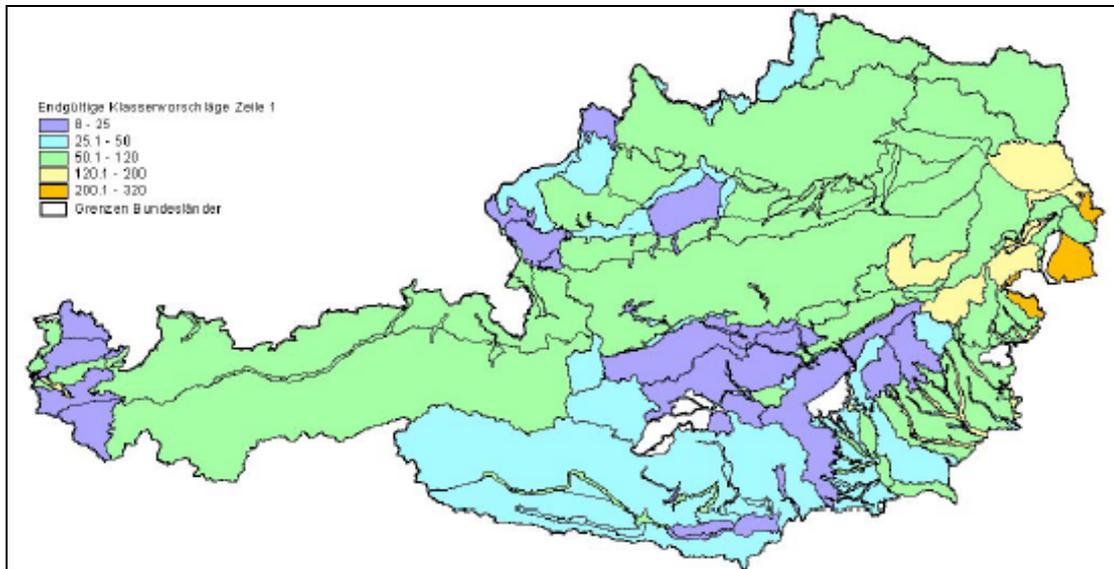
Die verbleibenden Daten wurden in einem ersten Schritt je Grundwasserkörper statistisch analysiert. Im Anschluss daran kam es zu einer Zusammenfassung der einzelnen Hintergrundwerte zu Klassen, um sowohl eine leichtere Visualisierung als auch eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Die Datendichte war jedoch über das gesamte Bundesgebiet gesehen recht unterschiedlich. Es standen Grundwasserkörper mit einer hohen Anzahl an Analysen Grundwasserkörpern ohne eine einzige Analyse gegenüber. Auch wiesen Analyseserien sehr häufig nur einen geringen Parameterumfang auf. Bei einer Reihe von Parametern reichte die Datenlage hydrochemischer Analysen nicht aus, für alle Grundwasserkörper und Gruppen von Grundwasserkörpern Hintergrundwerte zu definieren. In diesen Fällen wird auf zwei Grundlagen zurückgegriffen: einerseits auf Ergebnisse in benachbarten, lithologisch vergleichbar aufgebauten Grundwasserkörpern und andererseits auf Ergebnisse anderer geochemischer Untersuchungen. Dabei werden die Hintergrundwerte nicht statistisch rechnerisch ermittelt, sondern gutachterlich vergeben und eindeutig dokumentiert. An Hand dieser Vorgangsweise ist eine flächendeckende Darstellung für alle Grundwasserkörper des Bundesgebietes möglich.

## **5. Zustand der Umwelt in Europa - Regionalisierung auf die Ebene von Europa**

Die Europäische Umweltagentur (EUA, [www.eea.eu.int](http://www.eea.eu.int)) hat den Auftrag, Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit rechtzeitig sachdienliche, themenspezifische und zuverlässige Informationen für die Entwicklung und

Umsetzung solider Umweltpolitiken in der Europäischen Union und in anderen EUA-Mitgliedsländern bereitzustellen, um damit eine nachhaltige Entwicklung zu fördern und zu einer deutlichen, messbaren Verbesserung der Umwelt Europas beizutragen.



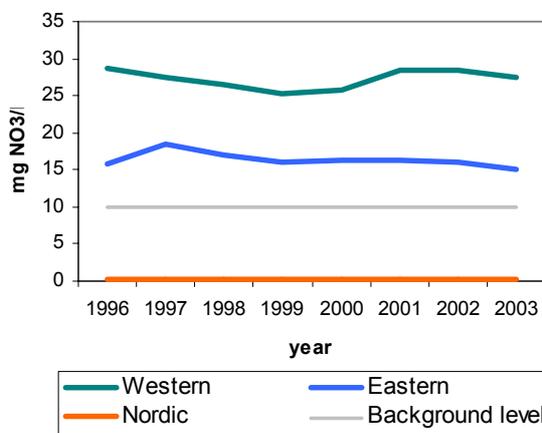
**Abb. 6:** Beispiel für die endgültige klassifizierte Darstellung geogener Hintergrundwerte für die abgegrenzten Grundwasserkörper und Gruppen von Grundwasserkörpern (Hobiger & Klein, 2004).

Zu diesem Zweck werden die besten in den Einzelstaaten verfügbaren Umweltdaten zusammengefasst und den Benutzern in verschiedenen Berichtsformaten zur Verfügung gestellt. Um die Ziele zu erreichen und die geforderten Fragen der Politik angemessen zu beantworten, werden die gesammelten Daten entsprechend hoch aggregiert und als Indikatoren aufbereitet. Eine Reihe von Grafiken visualisieren die Kernbotschaft zur gestellten Frage. Die erforderliche Regionalisierungsebene sind die Mitgliedsländer bzw. Europa.

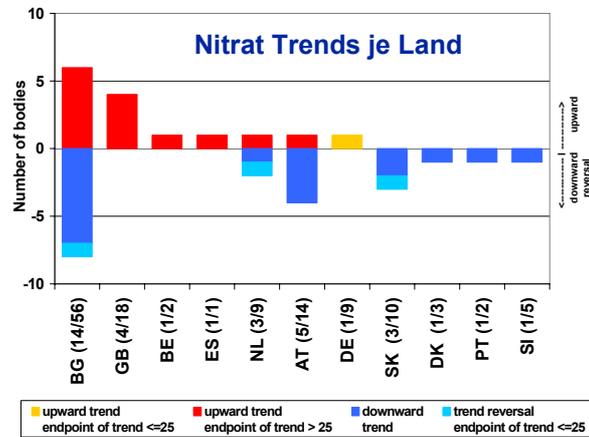
Die nachfolgenden Abbildungen demonstrieren beispielhaft am Indikator „Nitrat im Grundwasser“, die Hauptelemente der Indikatoren der EUA: Schlüsselfrage, Kernbotschaft und Grafik und sie zeigen, wie hoch aggregiert die Botschaften der EUA aufbereitet sind (EUA, im Entwurf)

**Schlüsselfrage:** Ist die Nitratkonzentration in Europa rückläufig?

**Kernbotschaft:** Die Nitratgehalte im Grundwasser verhalten sich seit den frühen 1990er Jahren relativ stabil. Unterschiede im Konzentrationsniveau bestehen zwischen den Regionen.



**Abb. 7:** Zeitliche Entwicklung der Mediankonzentration von Nitrat im Grundwasser (1996–2003) in den Regionen Europas.



**Abb. 8:** Anzahl an Grundwasserkörpern je Land mit statistisch signifikanten Trends für Nitrat.

## 6. Ausblick und Resümee

Durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen und durch die erkannten Erfordernisse des Grundwasserschutzes sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene kommt der Regionalisierung von Grundwasserqualitätsdaten ein immer größerer Stellenwert zu.

Wie im Beitrag dargestellt, ist die Grundwassergüteüberwachung mit einem entsprechenden Monitoring-Design aufbauend auf die Kenntnis des Grundwasserkörpers, der unterschiedlichen Einflussfaktoren, der Nutzungsansprüche und abhängiger aquatischer und terrestrischer Ökosysteme (konzeptionelles Verständnis) eine unbedingte Erfordernis. Die Informationen über die einzelnen Grundwasserkörper wie sie im Zuge der Umsetzung der WRRL systematisch erhoben wurden, die Abschätzung der natürlichen Hintergrundkonzentrationen, die Darstellung der Hydrochemie, Auswertungen über das Rückhaltevermögen gelöster Stoffe durch das IKT Petzenkirchen etc. stellen bereits eine gute Grundlage für weiter führende Arbeiten dar.

Mit entsprechenden Monitoring-Daten sollte eine Regionalisierung von Qualitätsdaten für einzelne Grundwasserkörper, aber auch die Ableitung von Analogieschlüssen für ähnlich gelagerte, aber gering beobachtete Grundwasserkörper möglich sein. Daher kommt der regelmäßigen Überprüfung der wasserwirtschaftlichen Erfordernisse sowie

des Informationsbedarfes eine große Bedeutung zu. Die Ergebnisse der Überprüfung müssen dann in die Konzeption des Monitoringsystems einfließen.

Derartige Grundlagen sind sowohl für die Beurteilung örtlich begrenzter als auch flächenhaft auftretender Belastungen sowie für die Ableitung von Maßnahmen erforderlich.

## **7. Literatur**

BGBI. 502/91 i.d.g. F: Grundwasserschwellenwertverordnung (GSwV).

BGBI. 338/91 i.d.g. F: Wassergüteehebungsverordnung (WGEV).

BMLFUW/Umweltbundesamt (2005) Wassergüte in Österreich, Jahresbericht 2004. Wien.

Umweltbundesamt (2004) Umweltsituation in Österreich. Siebenter Umweltkontrollbericht des Umweltministers an den Nationalrat. Wien.

CIS WG C (2006) Monitoring Guidance for Groundwater. Entwurf. EU Arbeitsgruppe WG C 'Grundwasser'.

BMLFUW (2005) Österreichischer Bericht der IST-Bestandsaufnahme. Wien.

Europäische Kommission (2001) The EU Water Framework Directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results. Technical Report Nr. 1. [www.wfdgw.net](http://www.wfdgw.net).

Europäische Kommission (2005) Groundwater Summary Report. Technical report on groundwater body characterisation, monitoring and risk assessment issues as discussed at the WG C workshops in 2003–2004. Brüssel.

Kralik M., I. Zieritz, J. Grath, G. Vincze, R. Philippitsch, H. Pavlik (2005) Hydrochemische Karte Österreichs, Mittelwerte von Wassergüteehebungsdaten (WGEV-Daten) 1991–2001. 2. überarbeitete Auflage. Umweltbundesamt BE-216.

Hobiger G., P. Klein (2004) Geogene Hintergrundgehalte oberflächennaher Grundwasserkörper (GEOHINT). Österreichweite Abschätzung von regionalisierten, hydrochemischen Hintergrundgehalten in oberflächennahen Grundwasserkörpern auf der Basis geochemischer und wasserchemischer Analysendaten zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG. Geologische Bundesanstalt. Wien.

Europäische Umweltagentur (EUA), im Entwurf: Nutrients in freshwater. <http://themes.eea.eu.int/indicators/>.

BRIDGE (2006) Background cRiteria for the IDentification of Groundwater thresholds. [www.wfd-bridge.net](http://www.wfd-bridge.net).

**Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. Andreas Scheidleder  
Dipl.-Ing. Johannes Grath  
Dipl.-Ing. Claudia Schramm  
Umweltbundesamt  
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien  
Email: andreas.scheidleder@umweltbundesamt.at

PD Dr. habil. Dipl.-Math. Steffen Uhlig  
quo data - Gesellschaft für Qualitätsmanagement und Statistik mbH  
Dresden  
Email: uhlig@quodata.de

# **REGIONALISIERUNG WASSERWIRTSCHAFTLICHER DATEN – BESCHREIBUNG DES MENGENMÄßIGEN ZUSTANDES VON GRUNDWASSERKÖRPERN**

Otto Vollhofer und Michael Samek

## **Zusammenfassung**

Seit Inkrafttreten der Wasserrechtsgesetznovelle 2003 sind flächendeckende Aussagen über den mengenmäßigen Zustand von Grundwasserkörpern zu treffen. Dafür werden Gebietsdaten benötigt, die erst durch Regionalisierung vorhandener Einzelinformationen hergeleitet werden müssen. Die vorliegende Arbeit beschreibt, wie im Rahmen der Ist-Bestandsanalyse in den einzelnen Grundwasserkörpern die Entnahmen und die verfügbare Grundwasserressource ermittelt wurden um erstmals den mengenmäßigen Zustand beschreiben zu können. Die Entwicklung der anzuwendenden Methoden unterliegt einem dynamischen Prozess, das heißt, dass zukünftig Ergänzungen und Änderungen durchaus notwendig und sinnvoll sein können.

## **1. Einleitung**

Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) 60/2000/EG ist am 23. Dezember 2000 in Kraft getreten. Ihr Ziel ist es, einen Ordnungsrahmen für Maßnahmen zum Schutz der Gewässer zu schaffen. Zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie wurde das Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959) durch BGBl. I Nr. 82/2003 novelliert. Damit war die rechtliche Grundlage für eine richtlinienkonforme, auf Einzugsgebiete bezogene Gewässerbewirtschaftungsplanung in Österreich geschaffen worden.

Durch Erweiterung der Bestimmungen des §30 WRG 1959 soll sichergestellt werden, dass eine nachhaltige Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristiges Schutzes der vorhandenen Ressourcen gefördert und der Zustand aquatischer Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete im Hinblick auf ihren Wasserhaushalt geschützt und verbessert werden.

Im Speziellen legt § 30c WRG 1959 fest, dass

- Grundwasserkörper oder Gruppen von Grundwasserkörpern bis zu dem bezeichneten Zeitpunkt einen guten chemischen und mengenmäßigen Zustand zu erreichen haben und
- sich der Ausgangszustand der Grundwasserkörper oder Gruppen von Grundwasserkörpern nicht verschlechtern darf (Verschlechterungsverbot).

Entsprechend den Vorgaben des WRG 1959 ist der gute mengenmäßige Zustand in einem Grundwasserkörper oder einer Gruppe von Grundwasserkörpern dann erreicht, wenn

- die verfügbare Grundwasserressource nicht von der langfristigen mittleren jährlichen Entnahme überschritten wird,

- der Grundwasserspiegel keinen anthropogenen Veränderungen unterliegt, die zu einem Verfehlen der ökologischen Qualitätsziele für in Verbindung stehende Oberflächengewässer und zu einer signifikanten Verringerung der Qualität dieser Gewässer und zu einer signifikanten Schädigung von Landökosystemen führt, die unmittelbar von dem Grundwasserkörper oder der Gruppe von Grundwasserkörpern abhängen.

## **2. Problemstellung**

Im Rahmen des durch das WRG 1959 vorgezeichneten Planungsprozesses war eine Ist-Bestandserhebung durchzuführen. Diese beinhaltete eine Beschreibung der ausgewiesenen Grundwasserkörper bzw. Gruppen von Grundwasserkörpern, im Rahmen derer

- die langfristigen mittleren Entnahmen und
- die verfügbare Grundwasserressource zu ermitteln waren.

Die Durchführung der Ist – Bestandsanalyse gestaltete sich insofern schwierig, weil weder eine systematische Erfassung und Dokumentation von Entnahmedaten, noch bundesweite Informationen über die verfügbare Grundwasserressource vorlagen.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass gemäß §124 WRG im Wasserbuch lediglich die zulässigen Höchstentnahmen ersichtlich zu machen waren und Wasserberechtigte in der Regel auch nicht verpflichtet wurden die tatsächlich entnommenen Wassermengen zu erfassen, aufzuzeichnen und der Behörde bekannt zu geben. Auch bestand vor in Krafttreten der WRRL keine Notwendigkeit flächendeckend über das gesamte Bundesgebiet die verfügbare Grundwasserressource zu ermitteln.

Nachstehend wird dargestellt, wie in den einzelnen Grundwasserkörpern oder Gruppen von Grundwasserkörpern die Entnahmen und die verfügbare Grundwasserressource durch einfache Regionalisierung von Einzelinformationen ermittelt wurden. Die Ergebnisse wurden im Strategiepapier Grundwasserentnahmen veröffentlicht.

## **3. Entnahmedaten**

Im Sinne der Richtlinie sind Entnahmen aus dem Grundwasser zu erfassen und zu beschreiben, um deren Einfluss auf den mengenmäßigen Zustand beurteilen zu können. Die Nutzung von Grundwasser erfolgt in Österreich im Bereich von Porengrundwasserkörpern durch Förderung aus Brunnen, im Bereich von Karst- und Klufgrundwasserkörpern in der Regel durch Ableitung von Quellwasser. Im Hinblick darauf, dass an Quellen nur das natürlich zu Tage tretende Grundwasser genutzt wird, und dadurch die Grundwasserspiegelverhältnisse anthropogen nicht beeinflusst werden, fallen Ableitungen von Quellwasser nicht unter den Begriff Entnahmen im Sinne der WRRL.

Um eine Abschätzung der tatsächlichen Entnahmemengen bestmöglich und mit vertretbarem Aufwand durchführen zu können, erwies sich folgende Gliederung als zweckmäßig.

- Entnahmen für die Öffentliche Wasserversorgung und Eigenförderung Trinkwasser, einschließlich Brauchwasserentnahmen für den Wohnbereich und den Netzbezug für Industrie und Gewerbe
- Entnahmen im Rahmen der landwirtschaftliche Eigenförderung, einschließlich Entnahmen für die Bewässerung von Grünflächen und Sportplätzen
- Entnahmen im Rahmen der industriell / gewerblichen Eigenförderung, einschließlich Wasserhaltungen von Baustellen, Entnahmen zum Zweck der Altlastensicherung

#### **4. Entnahmen für die Öffentliche Wasserversorgung und Eigenförderung**

Konkrete Angaben über die tatsächlichen jährlichen Trinkwasserentnahmen lagen nur für jene Wasserwerke vor, die auf freiwilliger Basis ihre Daten der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) zur Verfügung stellen. Diese Daten werden von der ÖVGW ausgewertet und in den Betriebsergebnissen der Wasserwerke Österreichs, zuletzt 2002, veröffentlicht. In diesen Betriebsergebnissen sind die Wasserversorgungsunternehmen mit Versorgungsgebieten über 20.000 Einwohnern zur Gänze und Versorgungsgebiete zwischen 5.000 und 20.000 Einwohnern fast zur Gänze erfasst. Über Versorgungsgebiete mit weniger als 5.000 Einwohnern liegen nur wenige Daten vor. Insgesamt werden von der ÖVGW - Statistik rund zwei Drittel der Gesamtbevölkerung Österreichs erfasst.

Um Aussagen über die gesamte tatsächliche jährliche Entnahme für die öffentliche Wasserversorgung und Eigenförderung Trinkwasser zu erhalten, war es erforderlich die fehlenden Angaben über diese Entnahmen aus dem Grundwasser indirekt aus vorhandenen und verfügbaren Daten abzuschätzen. Konkret wurden für alle Versorgungsgebiete, die den von der ÖVGW - Statistik erfassten Wasserwerken zugeordnet sind, spezifische Verbrauchszahlen ( $m^3/a$  und E) ermittelt. Auf Grundlage der ermittelten Zahlen wurden die Entnahmen in all jenen Gebieten abgeschätzt, die durch ein von der ÖVGW Statistik nicht erfasstes Wasserwerk versorgt werden. Bei der Ermittlung der spezifischen Verbrauchszahlen war zu berücksichtigen, dass die Grenzen der Versorgungsgebiete vielfach jedoch nicht mit der Abgrenzung der Grundwasserkörper übereinstimmen.

#### **5. Entnahmen im Rahmen der landwirtschaftlichen Eigenförderung**

Da auch über die jährlichen Grundwasserentnahmen für landwirtschaftliche Zwecke keine systematisch aufgezeichneten Daten vorliegen, mussten diese indirekt aus verfügbaren Agrarstrukturdaten ermittelt werden.

Grundlagen für die Ermittlung der jährlichen Entnahmen bildeten die veröffentlichten Ergebnisse der Agrarstrukturhebungen 1995 und 1999, wie die Größen der

bewässerbaren und der tatsächlich bewässerten Flächen, sowie der Anteil der einzelnen Fruchtarten an den bewässerten Flächen. Die jährlichen Entnahmemengen für Beregnungszwecke je Grundwasserkörper ergaben sich aus dem Produkt der für den einzelnen Grundwasserkörper ermittelten Beregnungshöhe und der tatsächlich bewässerten Fläche.

Die Ermittlung der Entnahmen für die Viehhaltung erfolgte für die einzelnen Gemeinden an Hand spezifischer Verbrauchszahlen für die einzelnen Tierarten und unter der Annahme, dass in Porengrundwasserkörpern der Wasserbedarf für die Viehhaltung aus dem Grundwasser und in Karst- und Kluftgrundwasserkörpern aus dem Quellwasser erfolgt. Der jährliche Wasserverbrauch für die Viehhaltung je Grundwasserkörper wurde aus der Summe des jährlichen Wasserverbrauches für die Viehhaltung aller Gemeinden, die innerhalb der Grenzen eines Grundwasserkörpers liegen, ermittelt.

Die jährlichen Entnahmemengen je Porengrundwasserkörper ergeben sich aus der Summe der jährlichen Entnahmemengen für Beregnungszwecke und für Viehhaltung.

## **6. Entnahmen im Rahmen der industriell / gewerblichen Eigenförderung**

Entnahmen der industriell/gewerblichen Eigenförderung sind Entnahmen aus dem Grundwasser für Industrie und Gewerbe (Entnahmen).

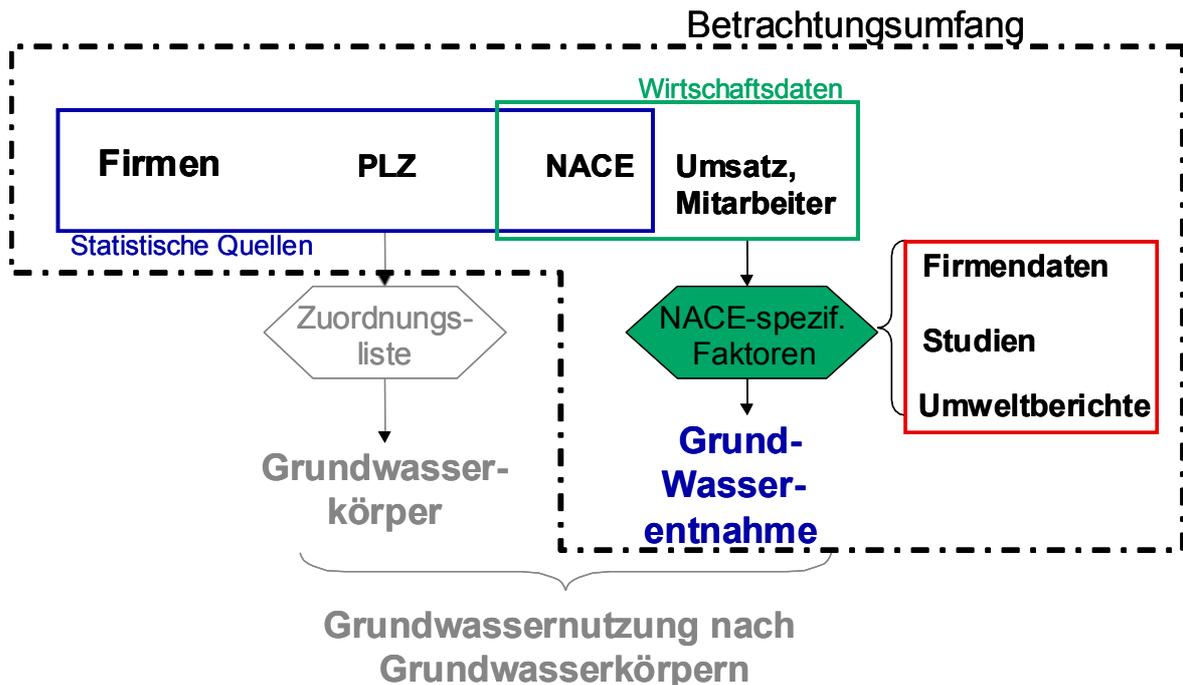
Da auch die tatsächlichen industriell/gewerblichen Entnahmen nicht systematisch ermittelt und aufgezeichnet wurden, lagen konkrete Angaben über die tatsächlich jährliche industriell/gewerbliche Eigenförderung aus dem Grundwasser nur für größere Betriebe vor.

Es war daher notwendig, die jährlichen industriell/gewerblichen Entnahmen aus dem Grundwasser indirekt aus vorhandenen und verfügbaren Daten abzuschätzen.

Im Rahmen einer vom BMLFUW beauftragten Ökonomiestudie bearbeitete das Institut für Industrielle Ökologie den Projektteil „Wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung für den Sektor Wirtschaft“. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine umfangreiche Datenbasis für den Wirtschaftsbereich angelegt, in der die Aktivitäten der einzelnen Betriebe nach ÖNACE Klassifikation auf Postleitzahlebene erhoben und dokumentiert wurden. An Hand der vorliegenden Wirtschaftsdaten wurden in den ausgewählten ÖNACE Klassen Wirtschaftstätigkeiten mit Werten von Umsatz und Mitarbeiterzahl quantifiziert. Für die einzelnen Betriebsgruppen erfolgte die Ermittlung des Wassereinsatzes über Faktoren, die aus Umweltberichten und Studien ermittelt wurden.

Um die im Rahmen der genannten Studie erarbeiteten Ergebnisse auch für die Ist – Bestandsanalyse nutzbar zu machen, wurde das Ausmaß der industriell-gewerblichen Grundwassernutzung über Postleitzahlen regionalisiert abgeschätzt.

Die Beibehaltung der Struktur der Wirtschaftstätigkeit in Verbindung mit den Postleitzahlen erlaubte die angestrebte Auswertung auf PLZ-Ebene. Abbildung 1 zeigt die Struktur und den Umfang der durchgeführten Arbeiten.



**Abb. 1:** Struktur der Aufgabenstellung und der durchgeführten Arbeiten (IIÖ, 2003)

Der auf Ebene der Postleitzahlen abgeschätzte Wasserverbrauch für die betrachteten ÖNACE-Klassen wurde nach Grundwasser-, Oberflächen-, und Netzentnahmen getrennt in Tabellenform dem Umweltbundesamt zur weiteren Auswertung übermittelt.

Vom Umweltbundesamt erfolgte eine Zuordnung der auf Ebene der Postleitzahlen ermittelten Daten auf die Gemeindeebene und in weiterer Folge auf die Ebene der Grundwasserkörper bzw. Gruppen von Grundwasserkörpern.

## 7. Verfügbare Grundwasserressource

Die verfügbare Grundwasserressource ist die langfristige mittlere jährliche Neubildung des Grundwasserkörpers abzüglich des langfristigen jährlichen Abflusses, der erforderlich ist, damit die ökologischen Qualitätsziele für die mit ihm in Verbindung stehenden Oberflächengewässer erreicht werden und damit jede signifikante Verschlechterung des ökologischen Zustands dieser Gewässer und jede signifikante Schädigung der mit ihnen in Verbindung stehenden Landökosysteme vermieden werden.

Bei der Festlegung der verfügbaren Grundwasserressource waren daher insbesondere die Abfluss- und Qualitätsverhältnisse der mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Vorfluter, die mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Landökosysteme, sowie die Belange des quantitativen und qualitativen Grundwasserschutzes zu berücksichtigen.

Abhängig von der Art des Grundwasserkörpers und der zur Verfügung stehenden Daten konnte die Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource an Hand folgender Größen erfolgen.

### **Grundwasserneubildung**

In einem Grundwasserkörper kann die verfügbare Grundwasserressource als ein bestimmter Anteil der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag und aus Randzuflüssen zu diesem Grundwasserkörper bestimmt werden. Die verfügbare Grundwasserressource ist entweder einheitlich für bestimmte Bereiche Österreichs oder entsprechend den lokalen hydrologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten für die einzelnen Grundwasserkörper getrennt festzulegen. Der Ermittlung der Grundwasserneubildung hat an Hand langjähriger Mittelwerte der sie bestimmenden Parameter zu erfolgen.

### **Niederwasserabfluss**

Maßgeblich für die Ermittlung der Grundwasserneubildung sind jene Niederwasserabflüsse, die unter Berücksichtigung der Belange des quantitativen und qualitativen Gewässerschutzes, der Vegetationsverhältnisse, der ökologischen Funktionsfähigkeit der Gewässer, des Natur- und Landschaftsschutzes, sowie die Abfluss- und Qualitätsverhältnisse in den Gewässern nicht unterschritten werden sollen.

Als verfügbar ist demnach jene Grundwasserressource zu bezeichnen, deren Entnahme nicht zu einem Unterschreiten des festgelegten Niederwasserabflusses führt.

### **Maßgeblich tiefer Grundwasserstand**

Als maßgeblich werden jene Grundwasserstände bezeichnet, die unter Berücksichtigung der Abfluss- und Qualitätsverhältnisse der mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Vorfluter, der mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Landökosysteme, sowie der Belange des quantitativen und qualitativen Grundwasserschutzes nicht unterschritten werden sollen. Für jeden einzelnen Grundwasserkörper haben entsprechende Festlegungen an den, das Gesamtsystem hydrologisch hinreichend gut charakterisierenden Messstellen zu erfolgen.

Als verfügbar ist demnach jene Grundwasserressource zu bezeichnen, deren Entnahme nicht zu einem Unterschreiten des festgelegten maßgeblichen tiefen Grundwasserstandes führt.

## **8. Einzelporengrundwasserkörper**

Um die verfügbare Grundwasserressource zu bestimmen, ist der maßgeblich tiefe Grundwasserstand so fest zulegen, dass

- es zu keinem Verfehlen der in der WRRL genannten ökologischen Qualitätsziele für in Verbindung stehende Oberflächengewässer und es zu

keinen signifikanten Schädigungen von Landökosystemen, die unmittelbar vom Grundwasserkörper abhängen, kommt (Ökologie),

- bestimmte Grundwasserverhältnisse (Gefälle, Strömungsrichtungen, Fließgeschwindigkeit und Schwankungen) auch bei diesem tiefen Grundwasserstand weiterhin erhalten bleiben (Grundwasserverhältnisse),
- bestimmte Nutzungen im erforderlichen Ausmaß gesichert sind (Nutzungen) und
- der maßgeblich tiefe Grundwasserstand keine Verschlechterung der Qualität des Grundwassers bewirkt (Qualität).

Die verfügbare Grundwasserressource für Einzelporengrundwasserkörper wurde über den maßgeblich tiefen Grundwasserstand ermittelt. Die gewählte Methode basiert auf der Annahme des Vorhandenseins repräsentativer Messnetze und auf der Überlegung, dass in Österreich gesicherte Grundwasserstandsdaten über einen langen Zeitraum für eine Vielzahl von Messstellen vorliegen. Unter diesen Voraussetzungen sind abgesicherte Aussagen über langjährige Veränderungen, die regionale Verteilung und die zukünftige Entwicklung des Grundwassergeschehens möglich.

Auswertungen der vorhandenen Daten haben ergeben, dass die verfügbare Grundwasserressource nicht in allen in Österreich vorhandenen Porengrundwasserkörpern durch die maßgeblich niederen Grundwasserstände beschrieben werden kann. Es war daher notwendig, für Porengrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage, andere Methoden der Ermittlung der Grundwasserneubildung und der verfügbaren Grundwasserressource zu entwickeln.

## 9. Einzelporengrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage

Bei Einzelporengrundwasserleitern mit unzureichender Datenlage wurde die verfügbare Grundwasserressource über die Grundwasserneubildung bestimmt.

Eine unzureichende Datenlage ist dann gegeben, wenn in einem Einzelporengrundwasserkörper kein repräsentatives über einen ausreichend langen Zeitraum beobachtetes Messnetz vorliegt (zuwenig Messstellen, zu kurze Beobachtungsreihen).

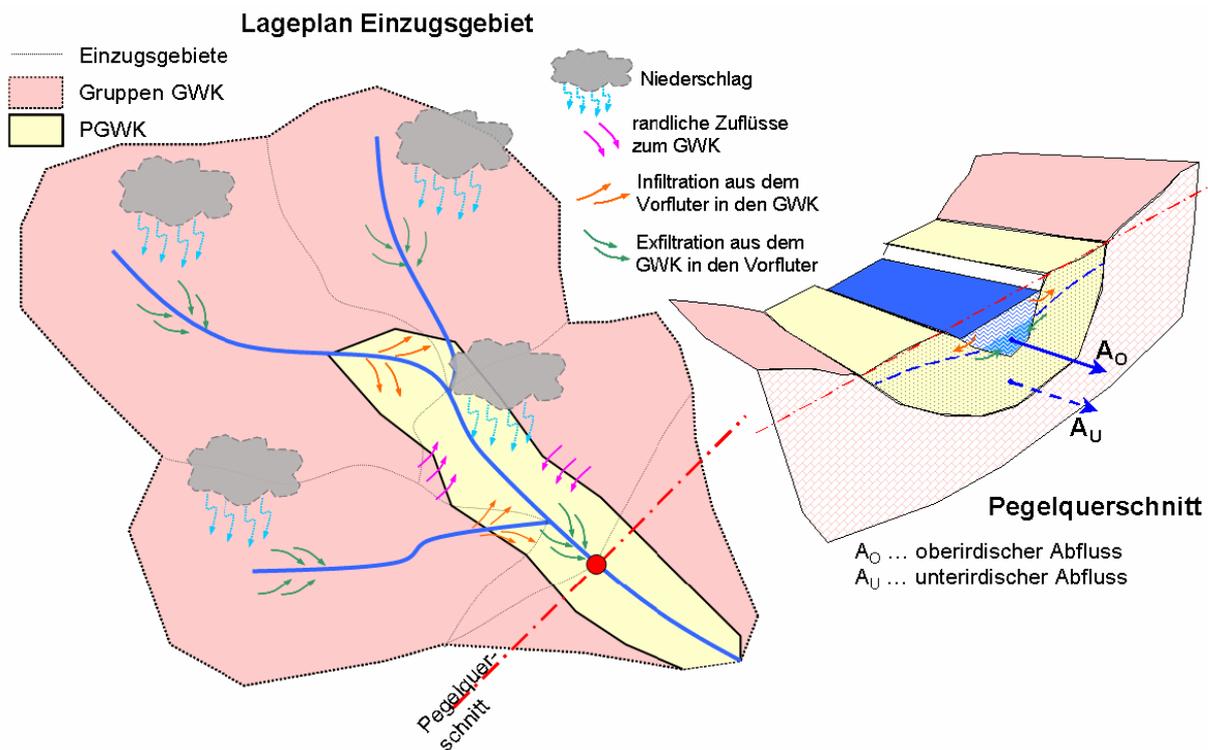
Die Grundwasserneubildung wird aus der Wasserbilanz und dem MoM<sub>NQ</sub><sub>T</sub>-Verfahren nach Wundt ermittelt.

Der Methode liegt die Überlegung zugrunde, dass an einem Pegelquerschnitt ein Teil der Grundwasserneubildung oberirdisch im Vorfluter ( $G_{WAO}$ ) der andere Teil unterirdisch im Grundwasser ( $G_{WAU}$ ) abfließt.

$$\text{Grundwasserneubildung}_{EZG} = G_{WAO} + G_{WAU} \quad (1)$$

Der oberflächlich abfließende Anteil wird mittels des MoM<sub>NQ</sub><sub>T</sub>-Verfahren, der unterirdisch abfließende Anteil über die Wasserbilanz ermittelt. Damit ergibt sich die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet aus:

$$\text{Grundwasserneubildung}_{EZG} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung} - MQ + MoM_{NQ}_T \quad (2)$$



**Abb. 2:** Schema der hydrologischen Situation in einem Porengrundwasserkörper und seinem Einzugsgebiet (Holler, 2004)

Angaben über die Niederschlagsverteilung, die potentielle Evapotranspiration, die mittlere Lufttemperatur und die Bodenbedeckung in den einzelnen Einzugsgebieten wurden dem Digitalen Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW 2003) entnommen. MQ und MoM<sub>NQ<sub>T</sub></sub> wurden aus vorliegenden Pegelaufzeichnungen ermittelt.

Im nächsten Schritt wurde die verfügbare Grundwasserressource in den nicht zum Einzelporengrundwasserkörper zählenden Teilen des Einzugsgebiets bestimmt. Da diese Teile ausschließlich aus Gruppen von Grundwasserkörpern gebildet werden, konnte die verfügbare Grundwasserressource nach der weiter unten beschriebenen für Gruppen von Grundwasserkörpern entwickelten Methode ermittelt werden.

Die Grundwasserneubildung im Einzelporengrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage ergibt sich aus der Differenz der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet und der verfügbaren Grundwasserressource aus den nicht zum Einzelporengrundwasserkörper zählenden Teilen des Einzugsgebiets.

Diese Methode wurde an ausgewählten, im Bereich der Einzelporengrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage gelegenen Pegel-einzugsgebieten (insgesamt 65 Einzugsgebiete) angewandt. Die Grundwasserneubildung in diesen Einzugsgebieten bildet die Grundlage für die

Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource in diesen Einzelporengrundwasserkörpern.

Mangels vorliegender Daten können weder Aussagen über das Gesamtausmaß noch über die ober- und unterirdisch abfließenden Anteile der verfügbaren Grundwasserressource getroffen werden. Um dennoch die geforderte Ist – Bestandserhebung in den Einzelporengrundwasserkörpern mit unzureichenden Daten durchführen zu können, wurde vorerst davon ausgegangen, dass die verfügbare Grundwasserressource einem zumindest 50 %-igen Anteil der Grundwasserneubildung entspricht.

## 10. Gruppen von Grundwasserkörpern

Eine Vielzahl der in Österreich nach den Vorgaben der WRRL ausgewiesenen Gruppen von Grundwasserkörpern weist hydrogeologisch heterogene Merkmale auf.

Auf Grundlage der nachstehend genannten Studien und Untersuchungen wurde eine einfach handzuhabende Methode zur Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource entwickelt.

- Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Quellwasserdargebotes im alpinen Raum Österreichs, BMLFUW, November 2001, (Bundesstudie)
- Nutzbares Grundwasserdargebot Niederösterreich, Amt der NÖ Landesregierung, April 2000, (Niederösterreichstudie)
- Einzugsgebiete und Tagesabflusswerte  $Q_T$  der längsten verfügbaren Reihen für ausgewählte außeralpine Pegel, BMLFUW (HZB), 2003

Im Rahmen der Bundes- und der Niederösterreichstudie wurde sowohl die mittlere Grundwasserneubildung ( $MoMNQ_T$  nach WUNDT,  $MoMNQ_T$  nach KILLE,  $MNQT$ ), als auch die verfügbare Grundwasserressource für ausgewählte geologisch bzw. geographisch unterschiedliche Einheiten (Einzugsgebiete), nach unterschiedlichen Methoden ermittelt. In der Bundesstudie erfolgte die Ermittlung des nutzbaren Dargebots an Hand von regionalisierten Gebirgsgruppen-Kennwerten. In der Niederösterreichstudie hingegen wurde der Anteil der verfügbaren Grundwasserressource an der mittleren Grundwasserneubildung für einzelne Einzugsgebiete ermittelt und für unterschiedliche geologische Einheiten regionalisiert. Für diese geologischen Einheiten wurde die verfügbare Grundwasserressource als Prozentzahl der mittleren Grundwasserneubildung angegeben.

Es war nicht möglich, die Ergebnisse beider Studien als Grundlage der Ist - Bestandsanalyse zu verwenden. Daher war eine geeignete Methode zur Abschätzung der verfügbaren Grundwasserressource in Gruppen von Grundwasserkörpern zu entwickeln.

Der, der Niederösterreichstudie zu Grunde liegende Ansatz beinhaltet auch die Ermittlung einer ausreichenden Restwassermenge zur Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit. Er wurde daher als praktikabel und als Grundlage für die Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource in Gruppen von

Grundwasserkörpern geeignet angesehen. Darauf aufbauend sollte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Datenlage eine österreichweit anzuwendende Methode zur Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource entwickelt werden. Mit der Entwicklung des Verfahrens und der Durchführung der Arbeiten wurde das Technische Büro DI C. Holler, Güssing beauftragt.

Eine detaillierte, das gesamte Bundesgebiet umfassende Auswertung von Pegeldaten war im Hinblick auf die zur Verfügung stehende Zeit und Mittel im Rahmen der Ist – Bestandsanalyse nicht möglich. Um dennoch für das gesamte Bundesgebiet Aussagen treffen zu können, wurden geologisch und naturräumlich ähnliche Gebiete zu Einheiten zusammengefasst. In diesen Einheiten wurden repräsentative Pegeleinzugsgebiete ausgewählt und für diese die Grundwasserneubildung und die verfügbare Grundwasserressource bestimmt. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser und den bereits vorliegenden Untersuchungsergebnissen wurden die Grundwasserneubildung und die verfügbare Grundwasserressource in diesen Einheiten festgelegt.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Anzahl der ausgewerteten Einzugsgebiete in unterschiedlichen geologischen und naturräumlichen Einheiten.

**Tab. 1:** Ausgewählte Pegel Einzugsgebiete (Holler, 2004)

<b>Übersicht über die ausgewerteten Einzugsgebiete</b>				
	Anzahl der ausgewählten EZG			
	Datenbasis			Gesamt
	Bundes- studie	HZB	NÖ- Studie	
Nördl. Kalkalpen	9		8	17
Grazer Bergland	2			2
Grebenzen	1			1
Helvetikum (Karbonat)	2			2
Vlbg. Molasse	3			3
Südl. Kalkalpen	5			5
Zentralzone	19		3	22
Böhm. Masse		3	8	11
Flysch	4		3	7
Schlier-OÖ		4		4
Traun-Enns-Platte	2			2
Salzach-Inn-Mattig etc.		3		3
Schlier-NÖ			4	4
Molasse-Weinviertel			4	4
Sbgld-Osteir. Molasse		2		2
SW-Steir. Molasse	1			1
M+Nbgld. Molasse		2		2
Summe	48	14	30	92

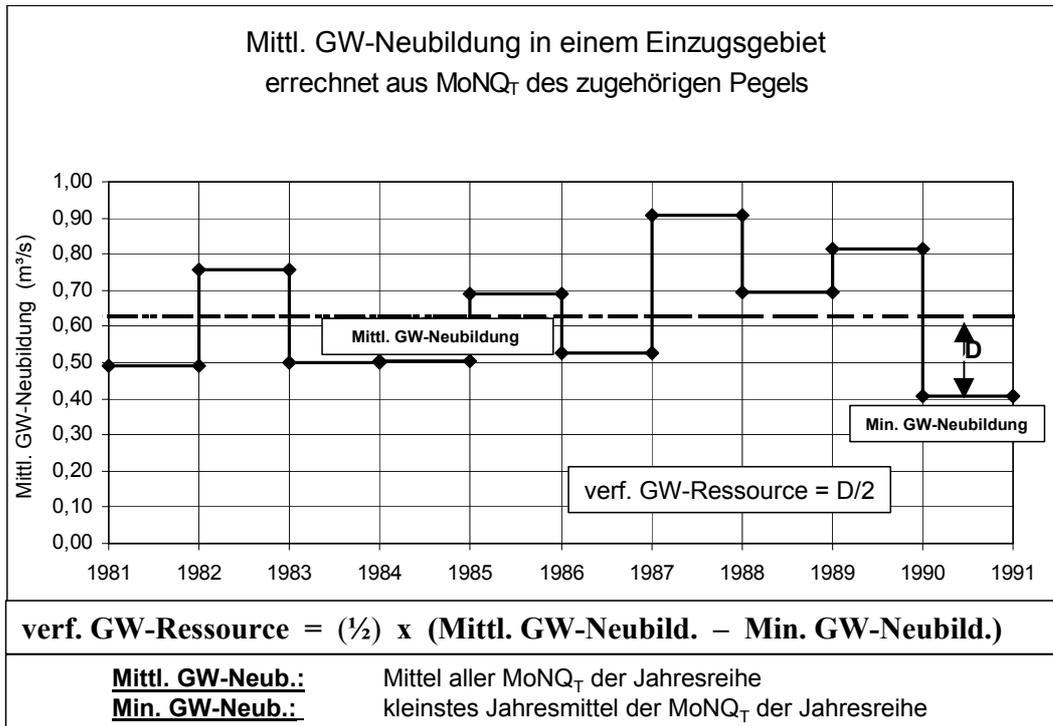
Nach Wundt kann die mittlere Grundwasserneubildung aus der Niederwasserführung des mit dem Grundwasserkörper in Verbindung stehenden Vorfluters ermittelt werden. Diesem Ansatz liegt die Vorstellung zu Grunde, dass in länger anhaltenden Trockenperioden die Niederwasserführung im Vorfluter allein aus dem Grundwasserkörper gespeist wird. Die mittlere Grundwasserneubildung ergibt sich als arithmetisches Mittel der niedrigsten monatlichen Tagesabflüsse (MoNQ T) aller Monate einer Bezugsjahresreihe (MoMNQT -Verfahren). Die Erstabschätzung der Grundwasserneubildung in den ausgewählten Einzugsgebieten erfolgte an Hand der Datenreihe 1981-90 nach der Methode von Wundt.

Diese Methode der Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource basiert auf folgenden Festlegungen:

Von einer Beeinträchtigung der mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Oberflächengewässer und Landökosysteme ist dann auszugehen, wenn die durch Entnahmen aus dem Grundwasser bedingte Reduktion des Durchflusses im Vorfluter mehr als 50 % der Differenz zwischen der mittleren und der minimalen Grundwasserneubildung beträgt.

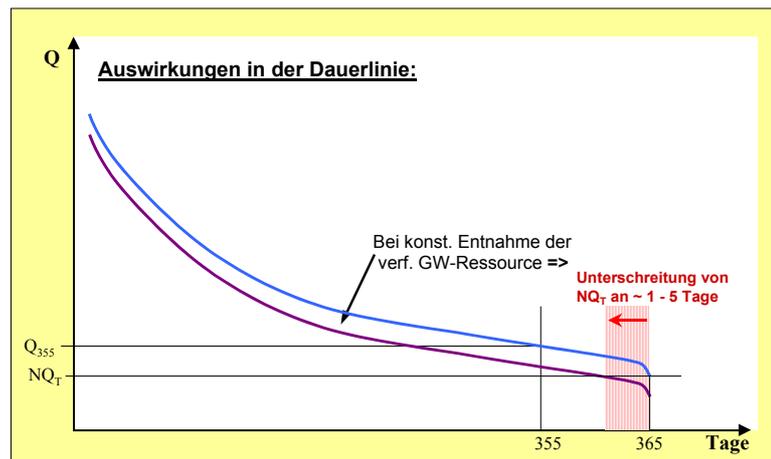
Die mittlere Grundwasserneubildung entspricht dem arithmetischen Mittel der niedrigsten monatlichen Tagesabflüsse (MoNQ T) der Jahresreihe 1981 bis 1990. Die minimale Grundwasserneubildung entspricht dem kleinsten Jahresmittel der

niedrigsten monatlichen Tagesabflüsse (MoNQ<sub>T</sub>) innerhalb der Jahresreihe 1981 bis 1990.



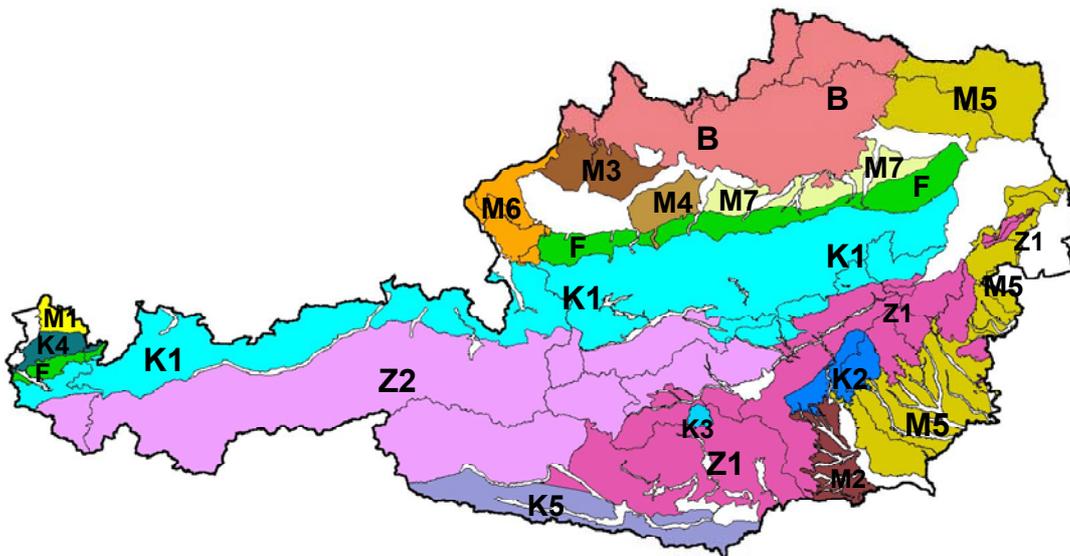
**Abb. 3:** Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource (Holler, 2004)

Die konstante Entnahme der verfügbaren Grundwasserressource aus einem Grundwasserkörper führt dazu, dass die Abflussdauerlinie des mit diesem in Verbindung stehenden Oberflächengewässers nach unten verschoben wird. Damit kann der Abfluss im Vorfluter unter den gemessenen natürlichen Extremwert NQ<sub>T</sub> absinken. Wie Auswertungen mittlerer Dauerlinien ausgewählter Einzugsgebiete zeigen, wird bei der festgelegten Ermittlung der verfügbaren Grundwasserressource NQ<sub>T</sub> nur an wenigen Tagen (1 bis 5 Tage) unterschritten. Die Dauer der möglichen Unterschreitung wurde als aus wasserwirtschaftlicher Sicht vertretbar angesehen.



**Abb. 4:** Auswirkung der konstanten Entnahme der verfügbaren Grundwasserressource auf die Dauerlinie des Abflusses (Holler, 2004)

Auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wurden Gebiete bestimmt, in welchen der Anteil der mittleren Grundwasserneubildung am Niederschlag und der Anteil der verfügbaren Grundwasserressource an der mittleren Grundwasserneubildung eine vergleichbare Größenordnung aufweist. Diese wurden sogenannten „Dargebotstypen“ zugeordnet (Abbildung 5).



**Abb. 5:** Abgrenzung der Dargebotstypen (Holler, 2004)

Für die einzelnen Dargebotstypen wurden die genannten Anteile in Form von Kennwerten ermittelt und in Form einer Tabelle dargestellt. Der prozentuelle Anteil der mittleren Grundwasserneubildung am Niederschlag wird als „Kennwert1“, der prozentuelle Anteil der verfügbaren Grundwasserressource an der mittleren Grundwasserneubildung wird als „Kennwert2“ bezeichnet. Die Kennwerte sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tab. 2:** Ermittelte Kennwerte für die Dargebotstypen (Holler, 2004)

Gebiete	Dar- gebots- typ	Kennwerte					
		KW1			KW2		
		Mittl. GW-Neubildung in % vom NS			nutzb. Dargebot in % der Mittl. GW-Neubild.		
		-Stabw	Mittel	+Stabw	-Stabw	Mittel	+Stabw
%	%	%	%	%	%		
<b>Vorarlberger-Molasse</b>	<b>M1</b>	14,5	<b>17,8</b>	21,1	12,9	<b>16,6</b>	20,4
<b>West-Stmk</b>	<b>M2</b>	8,4	<b>8,4</b>	8,4	15,3	<b>15,3</b>	15,3
<b>OÖ-Schlier</b>	<b>M3</b>	16,1	<b>20,8</b>	25,5	10,8	<b>15,9</b>	21,1
<b>Traun-Enns-Platte</b>	<b>M4</b>	19,1	<b>23,7</b>	28,4	13,0	<b>14,8</b>	16,6
<b>Salzach-Inn-Mattig</b>	<b>M6</b>	9,1	<b>23,4</b>	37,7	9,5	<b>13,8</b>	18,2
<b>Ost-Stmk+Weinviertel+Bgld.</b>	<b>M5</b>	5,2	<b>7,2</b>	9,2	9,8	<b>16,1</b>	22,3
<b>NÖ-Schlier</b>	<b>M7</b>	16,5	<b>18,0</b>	19,5	13,7	<b>15,8</b>	17,9
<b>Flysch gesamt</b>	<b>F</b>	8,7	<b>17,6</b>	26,5	11,6	<b>18,1</b>	24,6
<b>Nördl. Kalkalpen</b>	<b>K1</b>	29,6	<b>40,5</b>	51,4	8,7	<b>12,5</b>	16,4
<b>Grazer Bergland</b>	<b>K2</b>	24,1	<b>24,1</b>	24,1	12,7	<b>14,8</b>	16,8
<b>Grebenzen</b>	<b>K3</b>	27,1	<b>27,1</b>	27,1	9,2	<b>9,2</b>	9,2
<b>Helvetikum</b>	<b>K4</b>	13,9	<b>23,3</b>	32,6	17,8	<b>18,2</b>	18,7
<b>Südl. Kalkalpen</b>	<b>K5</b>	31,0	<b>37,9</b>	44,8	8,1	<b>10,3</b>	12,5
<b>Zentralzone-Südost</b>	<b>Z1</b>	27,2	<b>30,7</b>	34,1	6,1	<b>11,1</b>	16,2
<b>Zentralzone-Mitte+West</b>	<b>Z2</b>	38,2	<b>43,7</b>	49,1	7,7	<b>10,6</b>	13,5
<b>Böhm. Masse</b>	<b>B</b>	14,2	<b>19,0</b>	23,7	9,7	<b>15,0</b>	20,4

Im Rahmen der Ist – Bestandsanalyse wurden die Gruppen von Grundwasserkörpern einem „Dargebotstyp“ zugeordnet.

Der innerhalb der Grenzen der einzelnen Grundwasserkörper fallende mittlere Jahresniederschlag (Jahresreihe 1961 bis 1990) wurde dem Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW, 2003) entnommen.

Die in einer Gruppe von Grundwasserkörpern verfügbare Grundwasserressource [mm/a] ergibt sich aus dem Produkt des mittleren Jahresniederschlages (mm/a) und den Kennwerten des jeweiligen „Dargebotstyps“.

## 11. Zukünftige Datenerfassung

Um den Vorgaben des Wasserrechtsgesetzes hinsichtlich der Durchführung bzw. der Erstellung von Zustandserhebungen, Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen entsprechen zu können, werden für die Ermittlung der Entnahmen und sonstigen Belastungen des Grundwassers umfangreichere und genauere Daten als bisher erforderlich sein. Ein entsprechender Daten- und Informationsfluss zwischen den Wasserberechtigten und der Behörde muss somit

sichergestellt werden. Dazu ist es erforderlich, dass die Wasserberechtigten regelmäßig Daten über die mit ihren Aktivitäten verbundenen Belastungen des Grundwassers erheben und diese der Behörde übermitteln.

Darüber hinaus werden in allen ausgewiesenen Einzelporengrundwasserkörpern repräsentative Messnetze zu errichten und zu betreiben sein. Repräsentative ist ein Messnetz dann, wenn unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse anhand einer hinreichend großen Anzahl von Messstellen flächendeckende Aussagen über das quantitative Grundwassergeschehen getroffen werden können.

Um die verfügbare Grundwasserressource in Gruppen von Grundwasserkörpern besser erfassen und regionalisieren zu können, sind zusätzliche Pegelinzugsgebiete auszuwählen, soweit erforderlich zu instrumentieren, zu beobachten und die beobachteten Daten im Hinblick auf die Grundwasserneubildung auszuwerten. Auch wäre zu überlegen, ob, im Hinblick auf eine bessere Interpretation und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die Ermittlung der minimalen Grundwasserneubildung in den einzelnen Pegelinzugsgebieten zukünftig nicht auf Grundlage einer statistischen Auswertung der Niederwasserabflüsse (Auftrittswahrscheinlichkeit) erfolgen sollte.

## 12. Literatur

BMLFUW-Sektion VII. (2004) Strategiepapier Grundwasserentnahmen.

Holler C. (2004a) Erstabschätzung der verfügbaren Grundwasserressource für Gruppen von Grundwasserkörpern, Studie im Auftrag des BMLFUW, Güssing.

Holler C. (2004b) Erstabschätzung der verfügbaren Grundwasserressource für Einzelporengrundwasserkörper mit unzureichender Datenlage, Studie im Auftrag des BMLFUW, Güssing.

Holler C. (2004c) Grundwasserentnahmen für öffentliche Wasserversorgung und Eigenvorsorge der Haushalte, Studie im Auftrag des BMLFUW, Güssing.

Institut für Industrielle Ökologie. (2003) Auswirkung Grundwassernutzung auf Ebene der Postleitzahlen, St. Pölten.

Samek M. und Vollhofer O. (2004) Quantitative Risikobeurteilung von Grundwasserkörpern nach den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie(WRRL), *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Heft 3-4, 56. Jahrgang

Fuchs G., Samek M. und Vollhofer O. (2005) Quantitative Risikobeurteilung von Einzelgrundwasserkörpern auf Grundlage hydrographischer Daten, *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 83, BMLFUW.

**Anschrift der Autoren:**

Dipl. Ing. M. Samek

Dipl. Ing. Dr. O. Vollhofer

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Abteilung VII/4

Marxergasse 2, A-1030 Wien

E-mail: [michael.samek@lebensministerium.at](mailto:michael.samek@lebensministerium.at), [otto.vollhofer@lebensministerium.at](mailto:otto.vollhofer@lebensministerium.at)

# **REGIONALISIERUNG VON WASSERWIRTSCHAFTLICHEN DATEN ZUR ABSCHÄTZUNG VON STOFFFRACHTEN IN OBERFLÄCHENGEWÄSSERN**

Martin Wimmer

## **Zusammenfassung**

Mit dem Wasserrechtsgesetz 2003 wurde die Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG in österreichisches Recht umgesetzt. Zentrales Element der Wasserrahmenrichtlinie ist die Verpflichtung der Mitgliedstaaten zur Erstellung von Gewässerbewirtschaftungsplänen. Aus diesem Planungsansatz ergeben sich zahlreiche Aufgaben für die Wasserwirtschaft. Für den Bereich der stofflichen Belastung von Oberflächengewässern ist der gute Gewässerzustand in Form von Umweltqualitätsnormen festzulegen. Diese Umweltqualitätsnormen sind bei der Immissionsbetrachtung von Abwassereinleitungen und bei der Ist-Bestandsanalyse der Flusseinzugsgebiete zu berücksichtigen. Dabei stellt sich unter anderem die Aufgabe, bestimmte hydrologische Daten (MQ, Bezugswasserführung) sowie flussmorphologische Daten (Flussbreite und -tiefe) für jene Oberflächenwasserkörper zu ermitteln, in die eine Einleitung von Schadstoffen erfolgt.

## **1. Einleitung**

Aus dem Planungsansatz der Wasserrahmenrichtlinie ergeben sich für den Bereich der stofflichen Belastung von Oberflächengewässern folgende Aufgaben:

- Die Festlegung des guten Gewässerzustandes in Form von Umweltqualitätsnormen für einzelne Stoffe;
- Die Berücksichtigung der Umweltqualitätsnormen bei der Bewilligung von Abwassereinleitungen (Immissionsbetrachtung);
- Die Abschätzung, welche Oberflächenwasserkörper den guten Zustand möglicherweise verfehlen (Ist-Bestandsanalyse der Flusseinzugsgebiete);
- Die laufende Überwachung aller Oberflächengewässer und insbesondere die operative Überwachung jener Oberflächenwasserkörper, die den guten Zustand möglicherweise verfehlen werden;
- Die Aufstellung von Maßnahmenprogrammen im Hinblick auf die Erreichung des guten Zustandes bis 2015

Der erste Gewässerbewirtschaftungsplan ist für alle österreichischen Flusseinzugsgebiete bis 2009 zu erstellen. Für den Bereich der chemischen Schadstoffe wurden die Aufgaben 1 bis 3 abgeschlossen, an den folgenden Schritten wird derzeit gearbeitet. Eine zentrale Aufgabe dabei ist die Ermittlung von Schadstofffrachten. Hierfür werden auch hydrologische und flussmorphologische Daten benötigt, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

## 2. Umweltqualitätsnormen und kombinierter Ansatz

Mit der Qualitätszielverordnung (QZVO), BGBl. II Nr. 96 (2006), wurden Umweltqualitätsnormen für die für Österreich relevanten chemischen Schadstoffe gemäß den Vorgaben des Wasserrechtsgesetzes (§ 30a Abs. 2 Z. 2) festgelegt. Der kombinierte Ansatz, § 30g Wasserrechtsgesetz, besagt, dass Emissionen aus Punktquellen, insbesondere aus Abwassereinleitungen, auf der Grundlage des Standes der Technik zu begrenzen sind, dass jedoch strengere Emissionsbegrenzungen dann festzulegen sind, wenn dies zur Erreichung der Umweltziele erforderlich ist. Dementsprechend fordert § 5 Abs. 6 der QZVO, dass die zulässigen Schadstofffrachten bei der Bewilligung von Abwassereinleitungen unbeschadet der bestehenden Emissionsvorgaben jedenfalls so festzulegen sind, dass die Umweltqualitätsnormen nach einer bestimmten Entfernung unterhalb der Einleitung eingehalten werden. Diese Entfernung beträgt das Zehnfache der Gewässerbreite, mindestens jedoch einen Kilometer.

Die maximal bewilligbare jährliche Schadstofffracht  $F_{max}$  ergibt sich aus der Bezugswasserführung  $Q_{bez}$  am Bezugspunkt und der Umweltqualitätsnorm  $UQN$ :

$$F_{max} = k \cdot UQN \cdot Q_{bez} \quad (1)$$

Der Umrechnungsfaktor  $k$  beträgt 31,536, wenn  $UQN$  in  $\mu\text{g/l}$ ,  $Q_{bez}$  in  $\text{m}^3/\text{s}$  und  $F_{max}$  in  $\text{kg/a}$  angegeben ist. Eine allfällig bestehende Vorbelastung wäre in Gleichung (1) noch in Abzug zu bringen.

Die QZVO gibt in §5 vor, dass die Umweltqualitätsnorm als arithmetischer Jahresmittelwert einzuhalten ist. Geht man von dem Regelfall aus, dass der Einleiter eine konstante tägliche Schadstoffmenge emittiert, dann ergibt sich die resultierende Konzentration im Vorfluter als Quotient aus dieser Fracht ( $F_{max}/365$ ) und den jeweils auftretenden Tagesabflüssen  $Q_{Ti}$ . Es gilt dann die Beziehung:

$$\frac{1}{365} \cdot \sum_i \frac{F_{max}}{Q_{Ti}} \leq k \cdot UQN \quad i=1, \dots, 365 \quad (2)$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich die Bezugswasserführung als harmonisches Mittel über die Tagesabflüsse  $Q_{Ti}$  eines Jahres:

$$Q_{bez} = 365 \left/ \sum_i \frac{1}{Q_{Ti}} \right. \quad i = 1, \dots, 365 \quad (3)$$

Um die Einhaltung der Umweltqualitätsnorm auch in abflussschwachen Jahren zu gewährleisten, sollte für die Berechnung von  $Q_{bez}$  nach Gleichung (3) das Jahr mit dem langjährig niedrigsten mittleren Abfluss (NJMQ) herangezogen werden (Zessner et al., 2004).

Die nach Gleichung (3) definierte Bezugswasserführung  $Q_{bez}$  unterscheidet sich von der bisher für Immissionsbetrachtungen angewendeten Wasserführung  $Q_{95}$  (Abfluss, der an 95% der Tage eines Jahres erreicht bzw. überschritten wird). In Abb.1 ist das Verhältnis  $Q_{bez}/Q_{95}$  für die verfügbaren Abflussdaten des Zeitraumes 1951-2003 dargestellt.

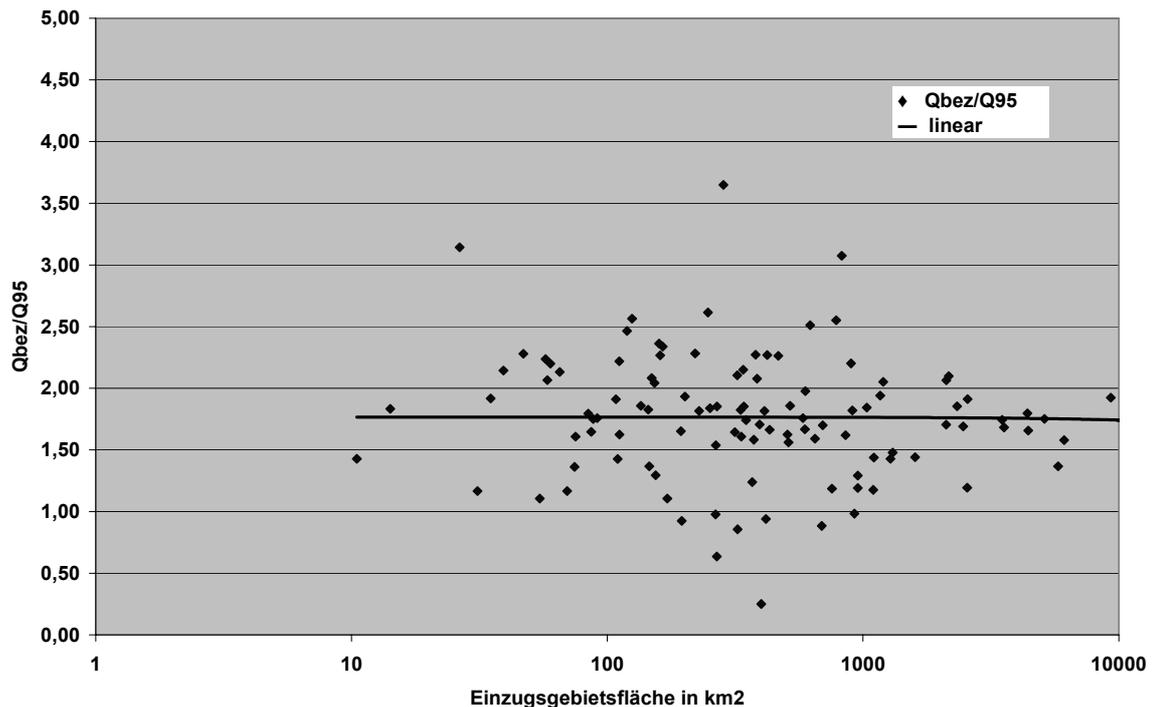


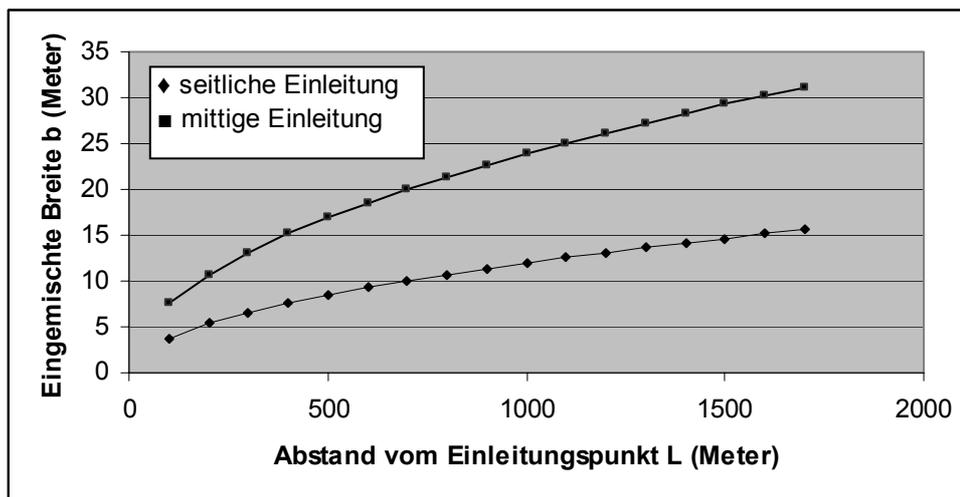
Abb. 1:  $Q_{bez}/Q_{95}$  für Pegelstellen an Fließgewässern über den Zeitraum 1951-2003.

Die Abbildung zeigt, dass das Verhältnis  $Q_{bez}/Q_{95}$  stark variiert und praktisch nicht von der Einzugsgebietsfläche abhängt. Die  $Q_{95}$ -Werte liegen in der Regel unter den jeweiligen Werten für  $Q_{bez}$ . Dies bedeutet, dass die Immissionsbetrachtung nach Gleichung (1) grundsätzlich auch mittels der  $Q_{95}$ -Werte durchgeführt werden kann. Ergibt sich dabei, dass die berechneten, maximal bewilligbaren Frachten größer sind als die nach dem Stand der Technik vorzuschreibenden Frachten, dann reichen die Vorgaben nach dem Stand der Technik jedenfalls zur Einhaltung der Umweltqualitätsnormen aus. Andernfalls muss eine exakte Berechnung der  $F_{max}$  nach den Gleichungen (1) und (3) durchgeführt werden und  $F_{max}$  als zusätzliche Emissionsbegrenzung vorgeschrieben werden.

Eine weitere Frage, die sich bei der Bewilligung von Abwassereinleitungen stellt, ist die Behandlung von Abwasserfahnen. Die QZVO verlangt in § 5 Abs. 6, dass die Umweltqualitätsnorm nach einer bestimmten Entfernung vom Einleitungspunkt innerhalb der Abwasserfahne einzuhalten ist. Erstreckt sich die Abwasserfahne über den Bezugspunkt hinaus, dann sind technische Maßnahmen zur rascheren Durchmischung zu treffen. Werden derartige Maßnahmen nicht getroffen, dann darf in die Immissionsbetrachtung nur jener Teil des Gewässers einbezogen werden, in den sich das Abwasser am betrachteten Bezugspunkt bereits eingemischt hat. Bei seitlicher Abwassereinleitung in einen Fluss von geringer Variabilität (keine starke Krümmung, keine seitlichen Totwasserzonen) ergibt sich die nach einer Entfernung  $L$  vom Einleitungspunkt eingemischte Breite  $b$  näherungsweise durch folgende Beziehung (Bleninger et al., 2004, Zessner et al., 2004):

$$b \approx \left( \frac{L \cdot h}{7} \right)^{0.5} \quad (4)$$

wobei  $h$  die Tiefe des Gewässers ist. Bei mittiger Einleitung ergibt sich ein doppelt so hoher Wert, bei Einleitung über einen Multiport eine entsprechende Vervielfachung. In Abb. 2 ist die eingemischte Breite  $b$  als Funktion der Entfernung von der Abwassereinleitung für ein Gewässer von 1 m Tiefe bei seitlicher bzw. mittiger Einleitung dargestellt.



**Abb. 2:** Einmischungsbreite  $b$  als Funktion der Entfernung von der Abwassereinleitung  $L$  für ein Gewässer der Tiefe  $h = 1$  m

Ist die nach Gleichung (4) ermittelte Breite der Einmischung  $b$  kleiner als die Breite des Flusses  $B$  an der betrachteten Stelle, dann darf für die Immissionsbetrachtung nur der Anteil  $b/B$  der Bezugswasserführung  $Q_{bez}$  angesetzt werden. Um die Immissionsbetrachtung für derartige Fälle anwenden zu können, müssen die Breite  $B$  und die Tiefe  $h$  bei der betrachteten Bezugswasserführung  $Q_{bez}$  bekannt sein.

### 3. Ist-Bestandsanalyse der stofflichen Belastung

Im Rahmen der Ist-Bestandsanalyse (BMLFUW, 2005) wurde eine Abschätzung vorgenommen, in welchen Oberflächenwasserkörpern die Umweltqualitätsnormen der QZVO voraussichtlich nicht eingehalten werden. Für diese Abschätzung wurden die jährlichen Frachten der einzelnen Schadstoffe aus Punktquellen (kommunalen Kläranlagen > 2.000 EW und industriellen Direkteinleitern) grob abgeschätzt und daraus die zu erwartende Konzentration im Gewässernetz ermittelt. Als Bezugspunkte für diese Betrachtung wurden die Oberflächengewässermessstellen der bundesweiten Wassergütererhebung gemäß Hydrographiegesetz, BGBl. Nr. 252/1990 i.d.g.F. herangezogen. Für diese Bezugspunkte wurde die Summe der Jahresfrachten aller Abwassereinleitungen im zugehörigen Teileinzugsgebiet ermittelt. Aus der berechneten Gesamtschadstofffracht und dem an den Bezugspunkten gegebenen langjährigen mittleren Jahresabfluss MQ wurde die zu erwartende Konzentration für jeden Schadstoff berechnet und mit der Umweltqualitätsnorm verglichen. Ein

Oberflächenwasserkörper wurde mit Risiko ausgewiesen, wenn die berechnete Konzentration für die darin liegende Messstelle 50% des Wertes der Umweltqualitätsnorm erreichte oder überschritt.

Da nicht für alle Messstellen der Wassergüteerhebung MQ-Werte vorliegen, mussten diese aus den bekannten Abflussspenden  $M_q$  an den bestehenden Pegeln durch Interpolation ermittelt werden. Abb. 3 demonstriert dies am Beispiel des Teileinzugsgebietes der Mürz.

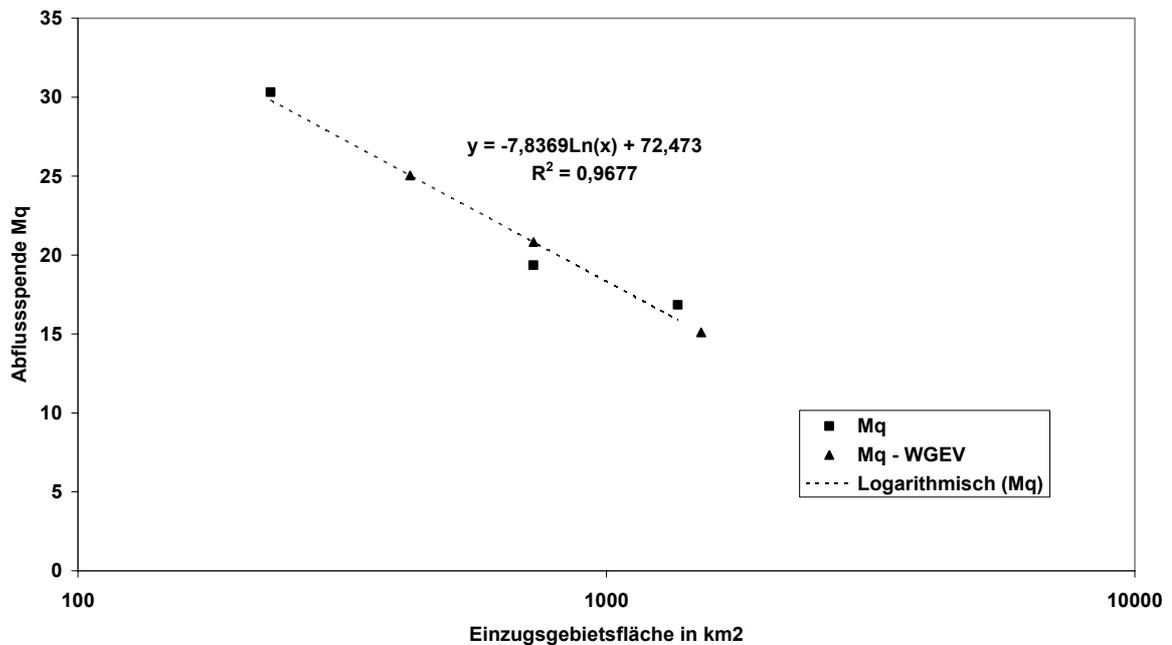


Abb. 3: Abflussspenden  $M_q$  als Funktion der Einzugsgebietsfläche im Teileinzugsgebiet der Mürz

Da die Flussbewirtschaftungspläne in Zyklen von 6 Jahren zu überarbeiten sind, werden Risikoabschätzungen dieser Art auch in Zukunft durchzuführen sein. MQ-Werte sollten zumindest in Form geeigneter Abschätzungen für alle Oberflächenwasserkörper zur Verfügung stehen, in die Abwasser aus Kläranlagen eingeleitet wird.

Die gezeigten Beispiele illustrieren, dass bestimmte hydrologische Daten (MQ, Qbez) sowie flussmorphologische Daten (Flussbreite und -tiefe) wichtige Hintergrundinformationen bei der Immissionsbetrachtung von Abwassereinleitungen und im Rahmen der Ist-Bestandsanalyse für Oberflächengewässer darstellen.

#### 4. Literatur

Bleninger, T., Jirka, G.H., Leonhard, D., Hauschild, I. und Schlenkhoff, A. (2004) Immissionsorientierte Bewertung von Einleitungen in Gewässer: Mischzonen oder Opferstrecken, wo gelten die Gütekriterien? *KA-Abwasser, Abfall* 51, 246.

BMLFUW (2005) Österreichischer Bericht der Ist-Bestandsaufnahme nach Artikel 5 der Richtlinie 2000/60/EG (Wasserrahmenrichtlinie) (2005); <http://publikationen.lebensministerium.at/>

Zessner, M., Kroiss, H. und Gabriel, O. (2004) Präzisierung von Qualitätszielen im Falle einer Anwendung bei der Einleitung aus Punktquellen, Studie im Auftrag des BMLFUW (2004); <http://publikationen.lebensministerium.at/>

**Anschrift des Verfassers:**

Dr. M. Wimmer  
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
Abteilung VII/2  
Marxergasse 2, A-1030 Wien  
E-mail: [martin.wimmer@lebensministerium.at](mailto:martin.wimmer@lebensministerium.at)