

# Aktuelle hydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung (Wettersteingebirge), Oberbayern

Von David Morche

Aufbauend auf den bisher vorliegenden Ergebnissen zu hydrologischen Messgrößen des Partnach-Ursprungs wurden Lösungsfracht und -abtragsbeträge für Deutschlands höchst gelegenes Karstplateau berechnet. Den wesentlichen Fortschritt der durchgeföhrten Arbeiten stellt die permanent ermittelte Wassertemperaturganglinie dar. Der Direktabfluss und der Basisabfluss können aufgrund von Wassertemperaturänderungen während eines Hochwasserereignisses, vor allem auch im ansteigenden Ast, voneinander separiert werden. Dies ist eine Erweiterung des klassischen Methodenspektrums zur Abflusskomponentenseparation in mitteleuropäischen Karstgebieten. Der Direktabfluss nimmt demnach während Hochwasserereignissen nur maximal 25 % ein.

## 1 Einleitung

Im Rahmen des SEDAG-Projektes (Sedimentkaskaden in Alpinen Geosystemen) werden seit dem Jahr 1999 in den Nördlichen Kalkalpen verschiedene geomorphologische Prozesse untersucht. Ziel ist die Erstellung eines Modells von Sedimentkaskaden hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Kopplungen verschiedener geomorphologischer Prozesse und deren Abtragsleistung. Eine dieser Sedimentkaskaden stellt das Reintal im Wettersteingebirge dar. Im Rahmen des Teilprojektes „Materialtransfer in alpinen Fließgewässersystemen – Mobilität und funktionale Kopplungen“ konnten bereits erste Ergebnisse zum Sedimentaustausch aus dem Reintal ermittelt werden [11]. Da das Reintal hinsichtlich des Transportes von gelösten Stoffen jedoch große Teile der Lösungsfracht aus dem höher gelegenen Zugspitzplatt über den Partnach-Ursprung erhält, ist es wichtig, genau diesen fluvialen Input von gelöstem Sediment zu kennen.

## 2 Untersuchungsbereich

Die Partnach entspringt als Karstquelle unterhalb des Zugspitzplattes. Ihr ist ein hydrologisches Einzugsgebiet von ca. 11,4 km<sup>2</sup> zugehörig, inklusive Zugspitzplatt, dem höchstgelegenen Karstplateau Deutschlands (Bild 1).

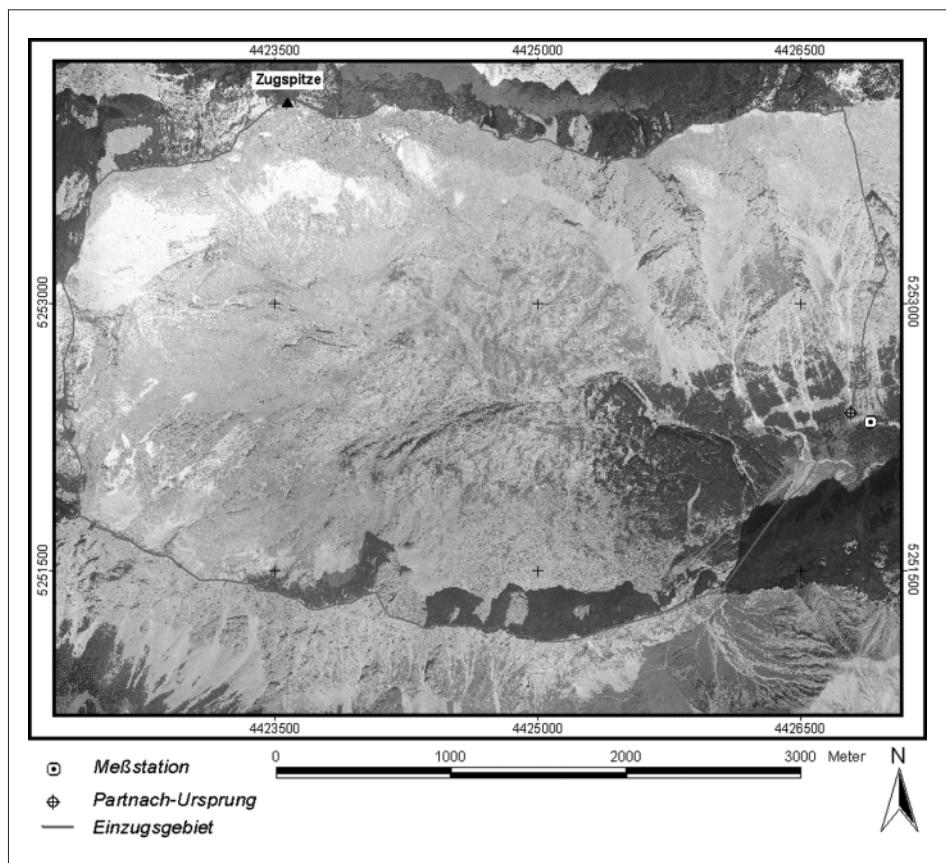


Bild 1: Das Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs. Orthophoto, Aufnahmedatum 04.09.2003, © Bayerisches Landesvermessungsamt, Nutzungserlaubnis vom 17.07.2005, Az.: VM3831B-oN/0880. Die auskartierte Gletscherfläche von 0,4 km<sup>2</sup> muss aufgrund von Neuschneefällen in den Tagen vor der Luftbildaufnahme als überschätzt gelten

Tabelle 1: Naturräumliche Ausstattung des Einzugsgebietes

Gewässer	Partnach	Quelle
<b>Fläche</b>	11,4 km <sup>2</sup>	[12]
<b>davon Gletscher</b>	0,4 km <sup>2</sup>	eigene Kartierung
<b>Max. Reliefunterschied</b>	1 534 m	eigene Kartierung
<b>Lithologie</b>	Triassischer Kalkstein (bis zu 800 m mächtiger Wettersteinkalk) Mergeliger Tonstein (Partnachsichten)	[7]
<b>Geomorphologie</b>	glazial überprägtes Karstrelief (Rundhöcker, Moränen, Schichtflächen und -köpfe, Dolinen, Karren)	[9], [2]
<b>Vegetationsgeographische Höhenstufen</b>	subalpin-nival	[2]
<b>Böden</b>	Carbonat-Syroseme, Protorendzinen, Tangelrendzinen, minerogene Braunerden	[9], [4]
<b>Niederschlag</b>	bis 3 600 mm/a	[9]

Tabelle 2: Ausgewählte Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen (LF = Lösungsfracht)

Messperiode	Dauer [d]	MQ [m <sup>3</sup> /s]	NQ [m <sup>3</sup> /s]	HQ [m <sup>3</sup> /s]	q [l/s · km <sup>2</sup> ]	LF [t]	LF-Spende [kg/d · km <sup>2</sup> ]	Abtrag [mm/d]
2002	106	1,39	0,56	8,41	122	713	590	2,2 · 10 <sup>-4</sup>
2003	157	1,02	0,56	4,99	89	787	440	1,6 · 10 <sup>-4</sup>
2004	153	1,84	0,48	6,44	161	1299	744	2,6 · 10 <sup>-4</sup>

Lithologisch ist das Einzugsgebiet aus homogenem Material, vorwiegend triassischem Kalkstein (Wettersteinkalk) mit einer Mächtigkeit von 600 bis 800 m aufgebaut [7]. Darunter liegen die waserdurchlässigen Partnachsichten (mergelige Tonsteine), welche in östlicher Richtung einfallen. Die Quelle des Partnach-Ursprungs tritt am Schnittpunkt zweier Störungen zu Tage, welche nahe der östlichen Einzugsgebetsgrenze liegen [12]. Auf kurzer Distanz weist das Einzugsgebiet einen hohen Reliefunterschied auf (Tabelle 1). Die Zugspitze (2 964 m) liegt in nur 3 km Entfernung vom Partnach-Ursprung (1 430 m) (Bild 1). Die jährliche Niederschlagsmenge kann 3 600 mm erreichen [9], [4].

### 3 Methoden

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf Daten, die im Laufe von drei Messperioden in den Jahren 2002 bis 2004 erhoben wurden. Es wurden Abflussmessungen mit hydrometrischem Kleinflügel (Typ OTT C 2) bei unterschiedlichen Wasserständen zur Generierung einer Abflusskurve durchgeführt. Eine Loggereinheit (Typ OTT Orpheus) zeichnet viertelstündlich Wasserstand, Temperatur sowie elektrische Leitfähigkeit auf.

#### 3.1 Abflusskurve

Insgesamt wurden 25 Abflussmessungen bei unterschiedlichen Wasserständen

durchgeführt. Die als Abflusskurve ermittelte Regressionsgleichung zwischen Wasserstand und Abfluss (Bild 2) ist hochsignifikant ( $p < 0,001$ ) und weist mit einer mittleren Abweichung (mean deviation) von 12 % vom gemessenen Abfluss einen deutlich geringeren Wert auf als die von [12] in den Jahren 1996 und 1997 ermittelte Abflusskurve an gleicher Stelle. Die genannte Abweichung ist dem turbulenten Fließverhalten der Partnach aufgrund der rauen Sohle zuzuschreiben.

#### 3.2 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit wird von der Loggereinheit mit einer vom Hersteller angegebenen Fehlertoleranz von 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufgezeichnet [8]. Daher musste die Leitfähigkeit zusätzlich manuell mittels Leitfähigkeitsmessergerät (Typ LF 323-B, WTW Weilheim) gemessen und die aufgezeichneten Werte danach kalibriert werden.

#### 3.3 Lösungskonzentration

Nach [1] und [12] kann anhand der elektrischen Leitfähigkeit alpiner Bäche auf die Gesamthärte ( $^{\circ}\text{dH}$ ) geschlossen werden. Diese Beziehung ist mit einem  $R^2$  von 0,99 sehr stark und gilt auch für die Partnach. Die Beziehung wird anhand der folgenden Formel ausgedrückt:

$$y = 0,0315 x - 0,3688 \quad (1)$$

wobei  $y$  der Gesamthärte in  $^{\circ}\text{dH}$  und  $x$  der elektrischen Leitfähigkeit in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  entsprechen.

Anhand der elektrischen Leitfähigkeit eines Wassers kann auf die Menge der in ihm gelösten Stoffe geschlossen werden [10]. Im Vergleich zu anderen alpinen Gewässern ist die Partnach nur schwach mineralisiert, was sich in sehr geringen Leitfähigkeitswerten (max. bis zu 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ausdrückt. Die im Wasser am Partnach-Ursprung aufgrund der homogenen Lithologie des Einzugsgebietes vorherrschenden Kationen  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  liegen im Verhältnis 4:1 vor [12]. Da  $1^{\circ}\text{dH}$  einer Konzentration von 17,85 mg/l  $\text{CaCO}_3$  oder 15 mg/l  $\text{MgCO}_3$  entspricht und das genannte Verhältnis zugrunde gelegt wird, entspricht  $1^{\circ}\text{dH}$  einer Konzentration von 17,28 mg gelösten Feststoffen pro Liter.

Die Konzentrationswerte wurden nun anstatt der Gesamthärte in die Regressionsgleichung (1) eingesetzt und anhand der aufgezeichneten Leitfähigkeitswerte die Lösungskonzentration berechnet.

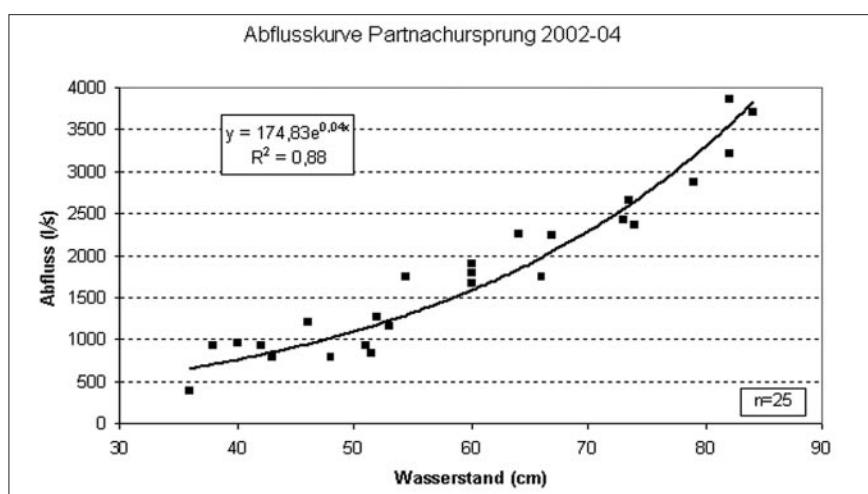


Bild 2: Wasserstands-Abfluss-Beziehung an der Messstation Partnach-Ursprung

Die so ermittelten Konzentrationen wurden mit den aus der Abflusskurve (Bild 2) ermittelten Abflüssen multipliziert. So konnte die Lösungsfracht während des Untersuchungszeitraumes ermittelt werden. Aus der Gesamtmasse der Lösungsfracht einer Messperiode und der Dichte von Kalkstein ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) wurde der Lösungsabtrag in mm für das gesamte Untersuchungsgebiet errechnet.

### 3.4 Probleme

Als problematisch erwies sich die schlechte Erreichbarkeit der Messstation. Von Garmisch-Partenkirchen aus fährt man ca. 45 Minuten bis zum Umschlagsplatz im Reintal. Von dort aus muss man zu Fuß noch ca. 6 km Wegstrecke bei einem Höhenunterschied von etwa 400 m bergauf weitergehen. Diese Gesamtstrecke kann leider nicht bei jeder Witterung gemacht werden, so dass die höchsten mit dem Kleinflügel gemessenen Abflüsse bei  $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$  lagen. Der Weg im Reintal und die Messstation selbst sind während der Wintermonate stark lawinengefährdet (Bild 3), so dass erst im Frühjahr mit der Installation der Messstation begonnen werden kann. Zum Teil liegen über dem Messsteg noch im Juni mehrere Meter Schnee.

Im Jahr 2003 kam es zu technischen Defekten an der Loggereinheit. So konnten die tiefsten Sommerwasserstände aufgrund des Trockenfallens des Sensors nicht erfasst werden (Bild 4). Die Dauer der Messperiode setzt sich daher nur aus den Tagen zusammen, an denen Daten aufgezeichnet wurden (Tabelle 2).

### 4 Ergebnisse

Um die Ergebnisse der einzelnen unterschiedlich langen Untersuchungszeiträume vergleichbar zu machen, wird die Lösungsfracht in  $\text{kg/d} \cdot \text{km}^2$  und der Abtrag in  $\text{mm/d}$  angegeben (Tabelle 2).

Zentraler Teil der vorliegenden Studie war die Erstellung möglichst lückenloser Abflussganglinien für die Karstquelle Partnach-Ursprung. Dies konnte trotz der schwer erreichbaren Messstation für die Jahre 2002 und 2004 gewährleistet werden (Bild 4). Lediglich in der Messsaison 2003 kam es zu technischen Problemen der Loggereinheit. Doch auch in diesem Jahr konnte das Abflussgeschehen über weite Strecken lückenlos aufgezeichnet werden. Das Trockenjahr 2003 kommt bei allen hydrologischen Parametern deutlich hervor, abgesehen vom Niedrigwasserab-



Bild 3: Lawine über Messsteg, Aufnahme vom Juni 2003 (Foto: M. Witzsche)

fluss. Dieser liegt in allen drei Jahren bei ca.  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dieser konstante Wert ist Ausdruck der permanenten Schmelzwasserschüttung des Partnach-Ursprungs. Erst wenn der im Einzugsgebiet noch vorhandene Gletscher „Schneeferner“ (Bild 1) abgeschmolzen ist, wird der Niedrigwasserabfluss unter  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  sinken. Typisch für das Karstregime kleiner Einzugsgebiete sind der steile Anstieg und das steile Abfallen der Hochwasserganglinien. Dies ist auch aus den Ganglinien der einzelnen Untersuchungsperioden herauszulesen (Bild 4), wobei der fallende Ast weniger steil abfällt. Deutlich stärker werden Hochwasserereignisse im unterstrom liegenden Reintal gepuffert. Dies kommt in flach abfallenden Rezessionsästen der Hochwässer zum Ausdruck [11]. Die Abflussspende des Untersuchungsge-

bietes ist, auch im Trockenjahr 2003, sehr hoch. Die erreichten Werte von bis zu  $161 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$  im Jahr 2004 sind aber in kleinen alpinen Einzugsgebieten nicht ungewöhnlich.

Die hydrologischen Eigenschaften kommen auch in den unterschiedlichen Lösungsfrachten bzw. -abträgen zum Ausdruck. Im Trockenjahr 2003 wurden nur etwa 50% der spezifischen Lösungsfracht von 2004 erreicht. Geht man von einem für die gesamte Untersuchungszeit gelgenden mittleren Abtrag von  $2,12 \cdot 10^{-4} \text{ mm/d}$  aus, ergibt sich ein postglazialer Lösungsabtrag von 77 cm (pro 10 000 a).

Weitergehende hydrologische Erkenntnisse zum Partnach-Ursprung lassen sich aus dem parallel zum Wasserstand und

## Current Hydrological Investigations at the Partnach River Spring (Wetterstein Mountains), Upper Bavaria

by David Morche

This paper deals with new results of hydrological research activities at the Partnach River spring. This spring drains the Zugspitzplatt, the highest karst plateau of Germany situated in the Wetterstein Mountains, Upper Bavaria. The study is a part of the joint project Sediment Cascades in Alpine Geosystems (SEDAG). The most important progress of this work is the use of water temperature as a predicting variable for separating the different flow components. During high flows storm runoff is responsible for only up to 25 % of total discharge. Additionally, chemical denudation rates are presented, which are much higher than values published earlier.

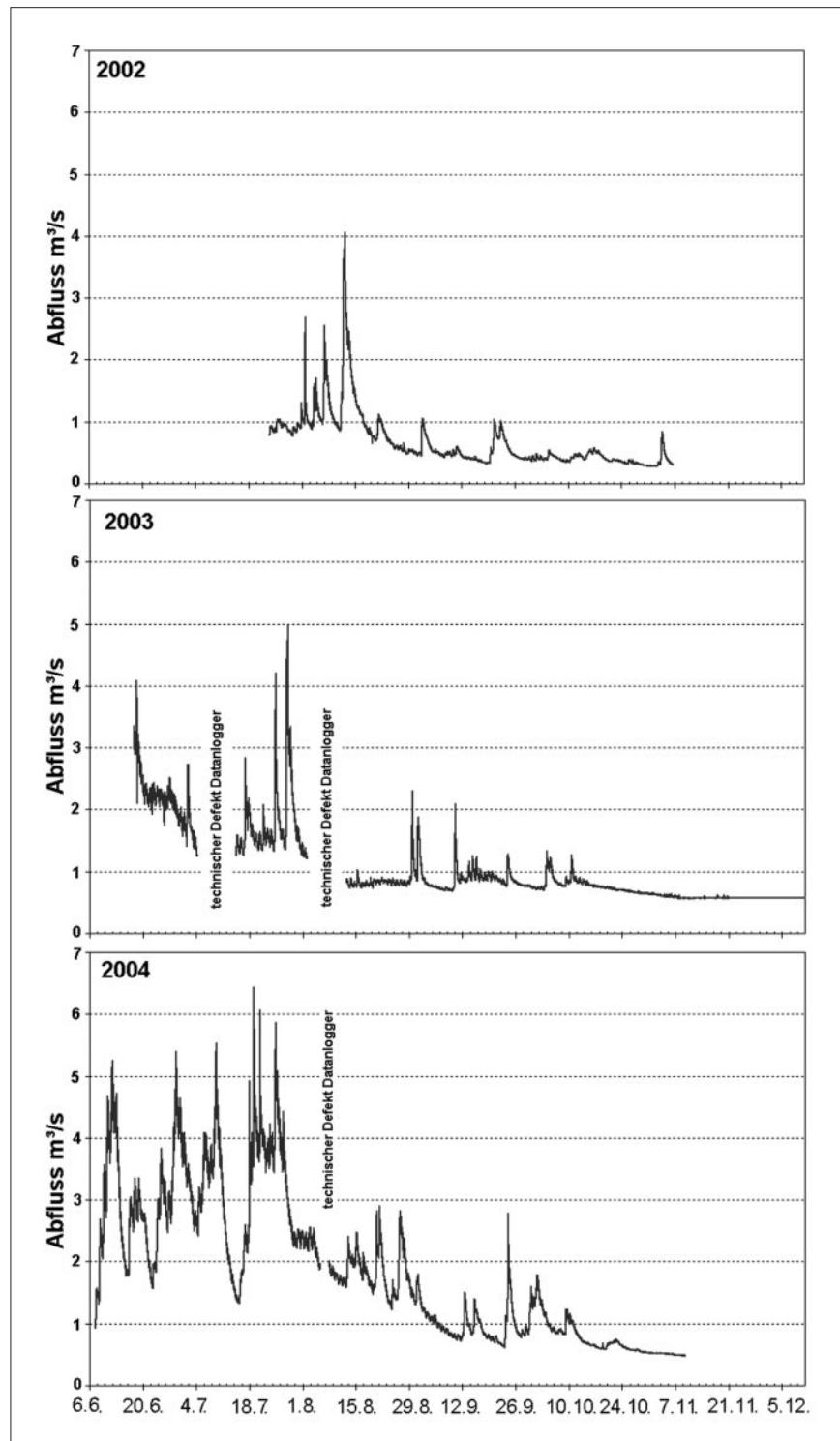


Bild 4: Abflussganglinien von 2002, 2003 und 2004

somit Abfluss aufgezeichneten Wassertemperaturwert gewinnen. Der Verlauf der Wassertemperaturänderung während eines Hochwasserereignisses kann anhand einer rechtsdrehenden Hysterese (clockwise hysteresis loop) beschrieben werden (**Bild 5a**). Anhand der Änderung der Wassertemperatur in der Folge eines Niederschlagsereignisses können die

Abflusskomponenten (Basis- und Direktabfluss) separiert werden. Die Ganglinien von Temperatur und Abfluss des Hochwasserereignisses vom 11.8. bis 13.08.2002 zeigen deutlich, dass einem Abflussmaximum immer ein Temperaturmaximum vorausgeht (**Bild 6**). Die Zeitverzögerung beträgt dabei zwischen 1 bis 8 Stunden.

Die Separation von direktem Abfluss und Basisabfluss gelingt mit einer Methodenkombination (two-component mixing model).

Vor Beginn des Hochwassers am 11.08.02 lag die Wassertemperatur um 4:00 Uhr bei 3,4 °C, danach stieg sie an und fiel erst am 13.08.02 um 1:30 Uhr wieder auf 3,4 °C zurück. Dieser Zeitpunkt kennzeichnet das Ende des Hochwasserereignisses. Durch eine Verbindung der beiden Punkte der Abflussganglinie, zugehörig den o.g. Zeiten, mittels einer Geraden, wurde der direkte Abfluss vom Basisabfluss getrennt (Bild 6).

Unter Verwendung eines Zwei-Komponenten-Modells kann die Abgrenzung zwischen direktem Abfluss und Basisabfluss im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle genauer erfolgen als dies durch eine Gerade möglich ist. Dabei muss von der Erhaltung von Wärme und Masse ausgegangen werden. Als Tracer dient die Wassertemperatur. Es gilt:

$$Q = Q_d + Q_b \quad (2)$$

$$Q_b = Q (T - T_d) / (T_b - T_d) \quad (3)$$

wobei  $Q$  der Gesamtabfluss,  $Q_d$  der direkte Abfluss und  $Q_b$  der Basisabfluss ist.  $T$ ,  $T_d$  und  $T_b$  sind die Temperaturen vom Gesamtabfluss, direkten Abfluss und Basisabfluss.

Die Temperatur des Basisabflusses ist 3,4 °C, die des direkten Abflusses, welche niederschlagsinduziert ist, ist schwer zu bestimmen. Kobayashi et al. [5] setzten diese Temperatur mit dem des Niederschlags gleich. Da jedoch keine Niederschlagstemperaturen vorliegen, kann dieser lohnende Ansatz nicht erfolgreich umgesetzt werden. Möglich ist eine Separierung jedoch durch eine Vereinfachung des Zwei-Komponenten-Modells, wobei das Verhältnis von  $Q$  zu  $T$  dem von  $Q_b$  zu  $T_b$  gleichgesetzt wird und somit  $Q_b$  während Hochwasserereignissen, vor allem auch während des ansteigenden Astes, ermittelt werden kann:

$$Q_b = Q \cdot T_b / T \quad (4)$$

Über (2) kann dann auch  $Q_d$  berechnet werden.

Die resultierende Basisabflussganglinie weicht deutlich von der graphisch separierten ab und zeigt, dass auch während hoher Gesamtabflüsse große Teile vom

Basisabfluss gespeist werden (Bild 6). Der Direktabfluss nimmt demnach maximal 25 % vom Gesamtabfluss ein.

Zieht man zusätzlich die Leitfähigkeit hinzu, zeigt sich erstaunlicherweise eine ähnliche Hysterese wie bei der Temperatur. Dies ist ungewöhnlich, da bei steigenden Abflüssen meist eine linksdrehende Hysterese der Leitfähigkeit auftritt. Jedoch ist dies für das Wasser am Partnach-Ursprung nicht ungewöhnlich. Nach Wetzel [12] kann nach Niederschlagsereignissen im Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs zunächst „altes“, höher mineralisiertes Karstwasser durch das weniger mineralisierte Niederschlagswasser verdrängt werden.

## 5 Diskussion

Der ermittelte Lösungsabtrag von 77 cm pro 10 000 a ist mehr als doppelt so hoch wie der von [2] publizierte Wert für den Lösungsabtrag für das Zugspitzplatt und seine umrahmenden Felswände von 27 cm pro 10 000 a. Diese große Abweichung ist damit zu erklären, dass Hüttl [2] in ihren Untersuchungen nur die oberflächige bzw. oberflächennahe Lösungsverwitterung einbezogen hat und unterirdische Prozesse außen vor ließ. Die spezifischen Lösungsfrachten lassen erkennen, dass große Anteile (bis zu 75 %) der Gesamtlösungsfracht des Einzugsgebiets der Messstation Bockhütte im Reintal bereits durch die Partnach in das Reintal eingetragen werden. Somit ist der Lösungsabtrag im Reintal selbst geringer als bisher angenommen [11].

Die Abflusskomponentenseparation mittels der Wassertemperaturänderung ist eine Erweiterung der bisher bestehenden Ansätze, z. B. graphischer Methoden und Tracer, wie elektrische Leitfähigkeit und Isotopen ([6], [3]), und wurde bisher nicht für mitteleuropäische Karstgebiete angewendet. Kobayashi et al. [5] konnten mittels der Wassertemperaturänderung nachweisen, dass der Oberflächenabfluss im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle mit zunehmendem Abfluss steigt. Der Verlauf der rechtsdrehenden Hysterese (Bild 5a) folgt dem von [5] beschriebenen Muster.

Wetzel [12] konnte eine Separation für den Partnach-Ursprung unter Verwendung klassischer Methoden der Abflussganglinienanalyse (graphische Methoden, elektrische Leitfähigkeit) für den fallenden Ast der Hochwasserganglinie durch-

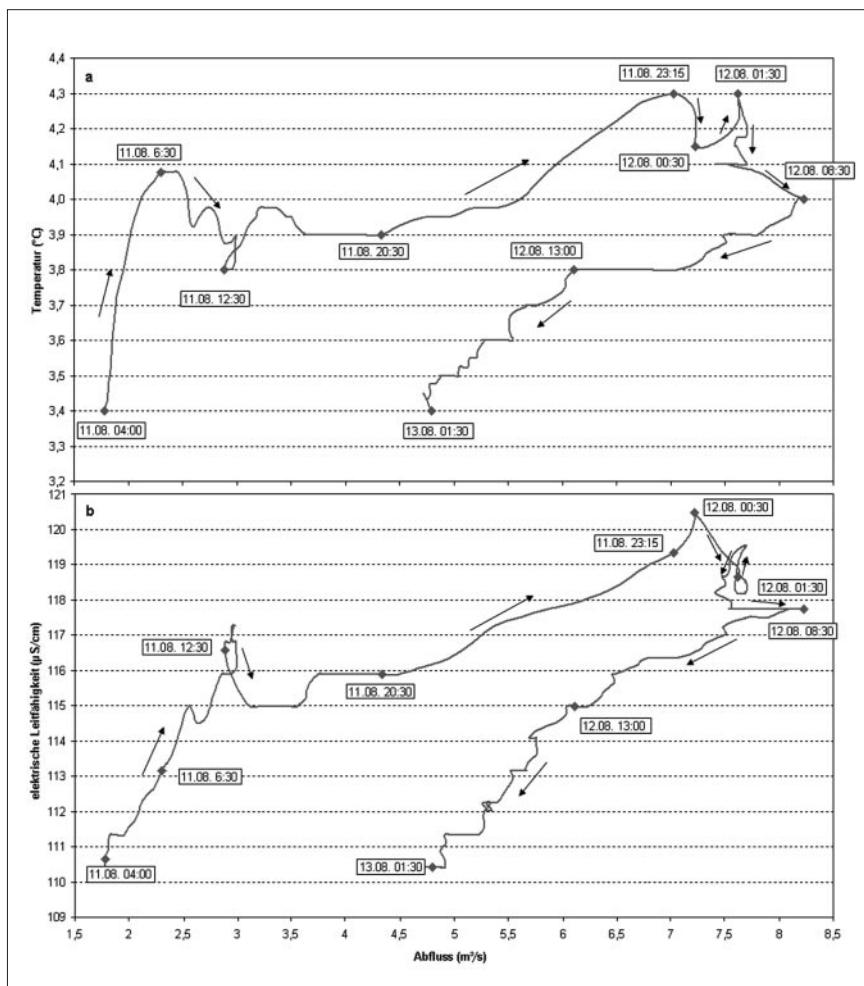


Bild 5: Zeitliche Veränderung der Wassertemperatur (a) und elektrischer Leitfähigkeit (b) mit dem Abfluss während des Ereignisses vom 11.–13.08.2002

führen. Insoweit gehen die hier vorgestellten Ergebnisse einen Schritt weiter, indem sie vor allem auch die Möglichkeit aufzeigen, wie die Verteilung der Abflusskomponenten während des ansteigen-

den Astes der Hochwasserwelle ermittelt werden kann.

Ferner konnte Wetzel [12] diverse Karstwasserleiter unterscheiden. Anhand von

Anzeige



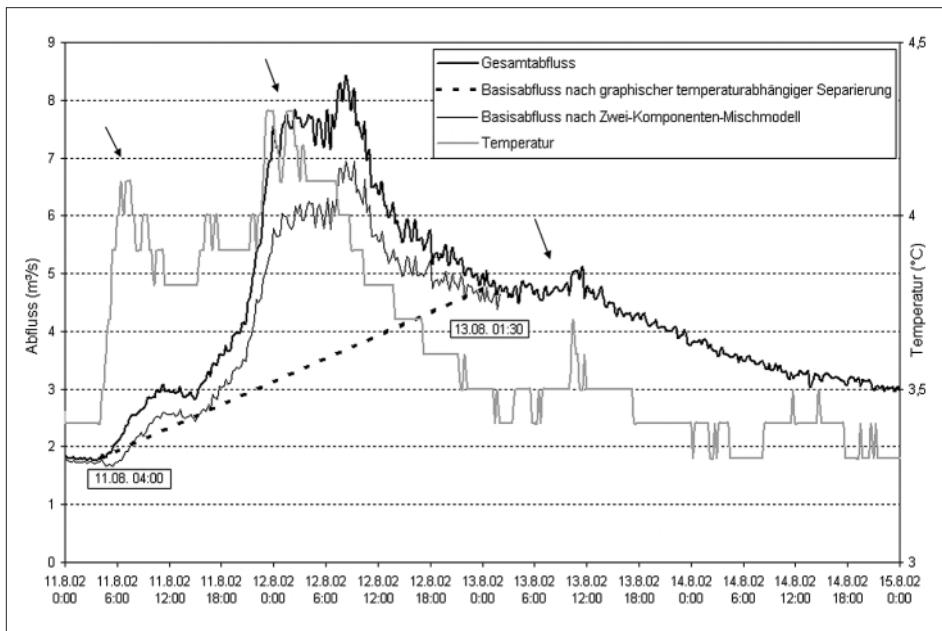


Bild 6: Ganglinien von Wassertemperatur, Gesamtabfluss sowie Basisabfluss, separiert nach graphischer Methode und Zwei-Komponenten-Mischmodell während eines sommerlichen Hochwasserereignisses. Die Pfeile markieren Temperaturmaxima kurz vor Abflussmaxima

Leitfähigkeitswerten ist auch der Nachweis von Verdrängungsprozessen infolge sommerlicher Starkregenereignisse von älterem Karstwasser durch jüngeres Niederschlagswasser gelungen. Zunächst wird das ältere Wasser im Karstwasserspeicher verdrängt, was durch die längere Verweildauer im System höhere Leitfähigkeiten aufweist. Erst danach kommt es zu einem Rückgang der Leitfähigkeit infolge des weniger mineralisierten Niederschlagswassers. Diese Prozesse sind auch für die rechtsdrehende Hysterese der Leitfähigkeit des Ereignisses am 11. bis 13.08.2002 verantwortlich zu machen (**Bild 5b**).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der hier dargestellten Ergebnisse, des nun bekannten Eintrages von gelösten Stoffen, ist es möglich, für die Jahre 2002 bis 2004 differenziertere Lösungsfrachten für das Reintal zu ermitteln, als es Schmidt und Morche [11] gelang.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass mittels Wassertemperatur als Tracer eine Abflusskomponentenseparation möglich ist. Verbessert werden könnte diese Methode durch Ergänzung mit Daten über die Temperatur des Niederschlags, welche aber nur schwer zu ermitteln ist.

Hydrologische Untersuchungen in den oberen Einzugsgebieten der Hochgebirge

sind in Zukunft von großer wasserwirtschaftlicher Relevanz. Aktuelle Zusammenhänge zum Klimawandel, zu dem damit einhergehenden Abschmelzen der Gletscher und somit der Wasserreserven der Gebirgsräume sind nicht von der Hand zu weisen. So sind im Wettersteingebirge vor allem die Reintalangerhütte, ein beliebtes Ziel von Bergwanderern und Mountainbikern, sowie die Bockhütte stark von der kontinuierlichen Schüttung der Partnachquelle abhängig. Zum einen aus Gründen der Wasserversorgung und zum anderen um die Stromversorgung mittels Wasserturbinen sicherzustellen. Je weniger Wasser in den Gebirgsräumen zur Verfügung steht, desto stärker ist die Nutzung dieser Räume zum Zwecke des Tourismus und damit als Wirtschaftsraum eingeschränkt.

### Danksagung

Die Untersuchungen wurden finanziell von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt (Az. SCHM 472/12-1-3). Fahrgenehmigungen wurden freundlicherweise von der Gemeinde sowie vom Forstamt Garmisch-Partenkirchen erteilt. Besonderer Dank gilt Prof. K.-H. Schmidt und Prof. K.-F. Wetzel für ihre wertvollen Anregungen und Kommentare sowie den studierenden Hilfskräften Antja Krause, Sebastian Fuchs, Holger Redlich und Markus Witzsche. Ohne ihren Einsatz wären die Geländearbeiten nicht erfolgreich durchzuführen gewesen.

## Literatur

- [1] Becht, M.; Füssl, M.; Wetzel, K.-H.; Wilhelm, F.: Das Verhältnis von Feststoff- und Lösungsaustausch aus Einzugsgebieten mit carbonatreichen pleistozänen Lockergesteinen der Bayerischen Kalkvorbergen. In: Göttinger Geographische Abhandlungen, 86 (1989), S. 33–43.
- [2] Hüttl, C.: Steuerungsfaktoren und Quantifizierung der chemischen Verwitterung auf dem Zugspitzplatt (Wettersteingebirge, Deutschland). Münchner Geographische Abhandlungen, Band B 30, München, GEOPUB-Verlag, 1997.
- [3] Jorlein, C.; Beven, K. J.; Iorgulescu, I.; Musy, A.: Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models. In: Journal of Hydrology, 255 (2002), S. 90–106.
- [4] Küfman, C.: Soil types and eolian dust in high-mountain karst of the Northern Calcareous Alps (Zugspitzplatt, Wetterstein Mountains, Germany). In: CATENA, 53 (2003), S. 211–227.
- [5] Kobayashi, D.; Ishii, Y.; Kodama, Y.: Stream temperature, specific conductance and runoff process in mountain watersheds. In: Hydrological Processes, 13 (1999), S. 865–876.
- [6] McNamara, J. P.; Kane, D. L.; Hinman, L. D.: Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques. In: Water Resources Research, 33 (1997), S. 1707–1719.
- [7] Miller, H.: Der Bau des westlichen Wettersteingebirges. In: Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 113 (1961), S. 161–203.
- [8] OTT Messtechnik GmbH (Hrsg.): ORPHEUS-K – Drucksonde mit Datensammler zur Pegelmessung von Grund- und Oberflächengewässern.
- [9] Rögner, K.; Hüttl, C.; Sass, O.: Verwitterung in den Nördlichen Kalkalpen. In: Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München, 84 (1999), S. 111–148.
- [10] Schmidt, K.-H.: Der Fluß und sein Einzugsgebiet. Wiesbaden, Steiner, 1984.
- [11] Schmidt, K.-H.; Morche, D.: Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. In: Geomorphology (in press).
- [12] Wetzel, K.-F.: On the hydrology of the Partnach area in the Wetterstein Mountains (Bavarian Alps). In: Erdkunde, 58 (2004), S. 172–186.

Anschrift des Verfassers:

*Dipl.-Geogr. David Morche*  
Institut für Geographie  
Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg  
Von-Seckendorff-Platz 4  
06120 Halle  
david.morche@geo.uni-halle.de

