

Adelheid Rappl, Karl-Friedrich Wetzel, Georg Büttner und Martin Scholz

Tracerhydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung

Dye tracer investigations at the Partnach Spring (German Alps)

Das Grundwasser hat einen Anteil von ca. 30 % am globalen Süßwasser. Da es jedoch unter einer mehr oder weniger mächtigen Gesteinsbedeckung liegt, entzieht es sich in den meisten Fällen der direkten Beobachtung. Mit der indirekten Erkundung von Grundwasserkörpern beschäftigt sich vor allem die Tracerhydrologie. Die Fluoreszenztracer, zu denen Uranin und Eosin gehören, sind heute die wichtigsten Markierungsmittel der Tracerhydrologie. Sie werden für die Abgrenzung von Einzugsgebieten, den Nachweis von Leckagen, der Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers und zur Ermittlung von hydrogeologischen Eigenschaften der Aquifere eingesetzt. In der vorliegenden Studie werden Farbtracer verwendet, um die Abgrenzung des Quelleinzugsgebietes der Partnach im Hochgebirgskarst des Zugspitzgebietes zu verifizieren und um die hydrogeologischen Eigenschaften des Karstsystems im Untergrund zu untersuchen. Die vorliegende Studie ist im Kontext umfangreicherer hydrologischer Untersuchungen zu sehen, die im Hochgebirgskarst des Wettersteingebirges vorgenommen werden sollen.

Schlagwörter: Farbtracer, hydrogeologische Eigenschaften, Karst, Quelleinzugsgebiete

Groundwater represents about 30 % of the global freshwater resources. Due to the coverage of the groundwater bodies by rocks of different thickness, direct observation of processes in aquifers is not possible in most cases. The indirect examination of groundwater bodies is the main subject of tracer hydrology. Today fluorescence tracers like Uranin and Eosin are the preferred markers in groundwater hydrology. The scope of their uses is wide. They are applied to delimit catchments, examine reservoir leakages, groundwater flow velocities and directions as well as hydrological aquifer characteristics. In the current study, the dye tracers Uranin and Eosin were applied to establish the catchment borders of the Partnach Spring in the high mountain karst system of the Zugspitze area. Furthermore, the hydrogeological characteristics of the karst aquifer were examined by means of the tracer test. The study was made in the context of a prospective research programme on high-mountain hydrology in the area of the Wetterstein Range.

Keywords: Dye tracers, hydrogeological characteristics, karst system, spring catchment

1 Einleitung

Hochgebirge sind bedeutsame Regionen für die Wasserversorgung der Vorländer, wie VIVRIOLI et al. (2007) feststellen. Gerade im Hinblick auf die sich zukünftig ändernden hydrologischen Verhältnisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel kommt einer verbesserten Kenntnis der Hochgebirgshydrologie eine große Bedeutung zu. Auch wenn in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte im Bereich der Hochgebirgshydrologie gemacht wurden (vgl. HERRMANN 2005, International Conference on Hydrology of Mountain Environments in Berchtesgaden), hat die Aussage von BANDYOPADHYAY et al. (1997), die die Hochgebirgshydrologie als „the blackest of black boxes in the hydrological cycle“ bezeichnen, immer noch Gültigkeit. Hydrologische Modelle zur Abschätzung des künftigen Wasserhaushaltes sind auf genaueres Wissen im Bereich des regionalen Wasserumsatzes im Gebirge angewiesen.

Die nördlichen Kalkalpen, zu denen auch die Bayerischen Alpen gehören, werden zu einem großen Anteil von Kalkgesteinen aufgebaut, die unterschiedlich stark verkarstet sind. Dadurch werden die schwierigen hydrologischen Verhältnisse des Hochgebirges zusätzlich verkompliziert. In verschiedenen Gebieten der bayerischen Alpen wurden in den vergangenen Jahren Tracerversuche mit dem Ziel durchgeführt, die Fließwege im Untergrund und das Speicherverhalten der Karstsysteme zu erkunden. Insbesondere sind hier die Untersuchungen von Hötzel und Goldscheider im Bereich des Hohen Ifen und der Alpspitze (GOLDSCHIEDER & HÖTZEL 1999, GOLDSCHIEDER 2002) sowie die bislang nicht vollständig publizierten Versuche des Geologi-

schen Dienstes des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) in den Berchtesgadener Alpen zu nennen (vgl. APEL et al. 2005). In der Schweiz wurden in den Karstgebieten des Alpsteins und der Churfürsten von LEIBUNDGUT (1995) und LEIBUNDGUT & VONDERSTRASS (1997) tracerhydrologische Untersuchungen vorgenommen.

Eine systematische tracerhydrologische Erkundung des Karstes im Bereich des Zugspitzplatts wurde bislang nicht vorgenommen, wenn man von dem 1980 durchgeführten Versuch von WROBEL (1980) im Zusammenhang mit dem Bau der Bahnstation auf dem Platt durch die Bayerische Zugspitzbahn AG absieht. Dieser Versuch und auch die hydrologischen Untersuchungen von WETZEL (2004 und 2005) haben bislang gezeigt, dass der Bereich des Zugspitzplatts ausschließlich über den Partnach-Ursprung entwässert. Aufgrund der beobachteten Fließgeschwindigkeiten und der kurzen Reaktionszeiten der Karstquelle nach Niederschlägen muss von einem sehr gut entwickelten Karstsystem im Untergrund ausgegangen werden. Offen blieben jedoch verschiedene Fragen, die mit einem neuen im August 2005 begonnenen Markierungsversuch geklärt werden sollten. Folgenden Fragestellungen wurde schwerpunktmäßig nachgegangen:

- Kann die bisherige Abgrenzung des Einzugsgebietes nach dem Relief beibehalten werden oder sind Wasseraustritte auch in benachbarten Gebieten zu beobachten?
- Kann das Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs als weitgehend hydrologisch abgeschlossen angesehen werden?
- Besteht insbesondere entlang der geologisch bedeutsamen „Gatterl-Störung“ eine hydrologische Verbindung in das südlich angrenzende Gaistal?

- Welche maximalen und welche mittleren Fließgeschwindigkeiten sind in dem Karstsystem zu beobachten?
- Wie sind die hydrologischen Verhältnisse des Karstsystems im Vergleich mit anderen Gebieten einzustufen?

2 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist im westlichen Teil des Wettersteingebirges gelegen und bildet den Talschluss des nach Osten offenen Reintales. Höchster Punkt ist die Zugspitze mit 2.962 m ü.d.M. (vgl. Abb. 1), während der Partnach-Ursprung auf 1.430 m ü.d.M. am Kreuzungspunkt mehrerer sich schneidender Verwerfungslinien unterhalb des Zugspitzplatts liegt. Die Entfernung zum höchsten Punkt des Gebietes an der Zugspitze beträgt 3,6 km, wobei ein Höhenunterschied von 1.532 m besteht. Unterhalb der Zugspitze befindet sich der größte Gletscher der Bayerischen Alpen, der heute ca. 30,7 ha große nördliche Schneeferner (KFG 2009). In den letzten 30 Jahren konnte an diesem Gletscher ein starker Eisschwund beobachtet werden (vgl. auch HERA 1997). Da neben dem nördlichen Schneeferner noch weitere Gletscherreste und Firnflächen im Versuchsgebiet existieren, beträgt die gesamte vereiste Fläche ca. 40 ha oder 3,5 % der Gebietsfläche. Mehr als 40 % des Einzugsgebietes sind weitgehend vegetationslos. Unterhalb der Baumgrenze stockt in vor Stein-schlag und Lawinen geschützten Lagen ein alpiner Bergwald, oberhalb dominieren neben Felsflächen alpine Matten.

Im gesamten Versuchsgebiet ist nach MILLER (1962) der 213 bis 220 Mill. Jahre alte Wettersteinkalk (Ladin) gesteinsbildend, der als einer der bedeutendsten Rifffbildner in den Kalkalpen gilt. Im Liegenden ist der Wettersteinkalk als deutlich gebankter dunkler Kalk oder auch als Dolomit aus lagunärer Rückseitenfazies ausgebildet. Die mittleren Partien werden durch massige, helle Kalke mit Schwämmen als Haupttriffbildnern aufgebaut. Der oberste

Abschnitt besteht aus gut gebankten hellen Kalken. Unter dem Wettersteinkalk folgen die ebenfalls dem Ladin zugeordneten Partnachschichten, deren Mächtigkeit bis zu 400 m beträgt und die von alpinem Muschelkalk unterlagert werden. Die Partnachschichten bestehen aus feinplattigen, dunklen, tonig-mergeligen Kalken und wirken zumeist wasserstauend, so dass es in ihrem Hangenden vielfach zu Quellaustritten kommt. Das stark verkarstete Zugspitzplatt gehört mit einer Fläche von ca. 6 km² zu den großen Karsthochflächen der Nordalpen, deren Formenschatz mit Dolinen, Schlucklöchern und Karrenfeldern während der pleistozänen Vereisungen glazial stark überprägt wurde (FISCHER 1995).

Bisher wird das ca. 11,4 km² große hydrologische Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs nach den vorliegenden hydrogeologischen Erkundungen von WROBEL (1980) und ENDRES (1997) weitgehend dem Relief nach abgegrenzt. Die Grenze verläuft danach entlang der Kämme einer nach Ost-Nordost abtauchenden geologischen Mulde (MILLER 1962), in der sich der tiefe Trog des in Streichrichtung verlaufenden Reintales befindet. Die Gebirgsumrahmung der ausstreichenden geologischen Mulde überragt das von ihr eingeschlossene Zugspitzplatt um mehrere hundert Meter in Form von steilen, z.T. fast wandartigen Hängen. Im Osten wird die Einzugsgebietsgrenze der Geomorphologie nach vom tiefsten Punkt im Gatterl in fast gerader Linie auf den Partnach-Ursprung und von dort nordwärts über den kleinen und den großen Kirchturn zur äußeren Höllentalspitze gezogen (vgl. Abb. 1). Das Zugspitzplatt bildet den zentralen Bereich des Einzugsgebietes.

Nur im Westen wird das Einzugsgebiet durch die Schichtgrenze zwischen Wettersteinkalk und Alpinem Muschelkalk bzw. Neokom gebildet, da aufgrund des Schichteinfallens und fehlender oberflächlicher Abflüsse mit Versickerung in den Karstkörper gerechnet werden kann. Perennierende Ge-

wässer treten auf dem Zugspitzplatt nicht auf. Die geologische Mulde wird von den Wasser stauenden Partnachschichten unterlagert (vgl. Abb. 2). Nach Osten begrenzen Verwerfungen die geologische Struktur des Zugspitzplatts. Entlang dieser Verwerfungen ist das Zugspitzplatt gegenüber dem östlich anschließenden Reintal abgesenkt (vgl. Abb. 2). Die Nordost-Südwest verlaufende Gatterl-Störung lässt sich über den Hauptkamm hinaus in das südlich anschließende Gaistal verfolgen (vgl. Abb. 1 u. 4). Das Gaistal liegt etwa auf der gleichen Meereshöhe wie der Partnach-Ursprung, so dass eine Entwässerung vom Zugspitzplatt entlang der Verwerfung nach Süden plausibel erscheint. Der Partnach-Ursprung liegt am Kreuzungspunkt der genannten Verwerfungen, an denen das Karstwasser zum Aufstieg gezwungen wird (vgl. Abb. 1). Nach den bisherigen Untersuchungen (vgl. WETZEL 2004) erfolgt offenbar die gesamte Entwässerung des Einzugsgebietes über den Quelltopf des Partnach-Ursprungs. Dies

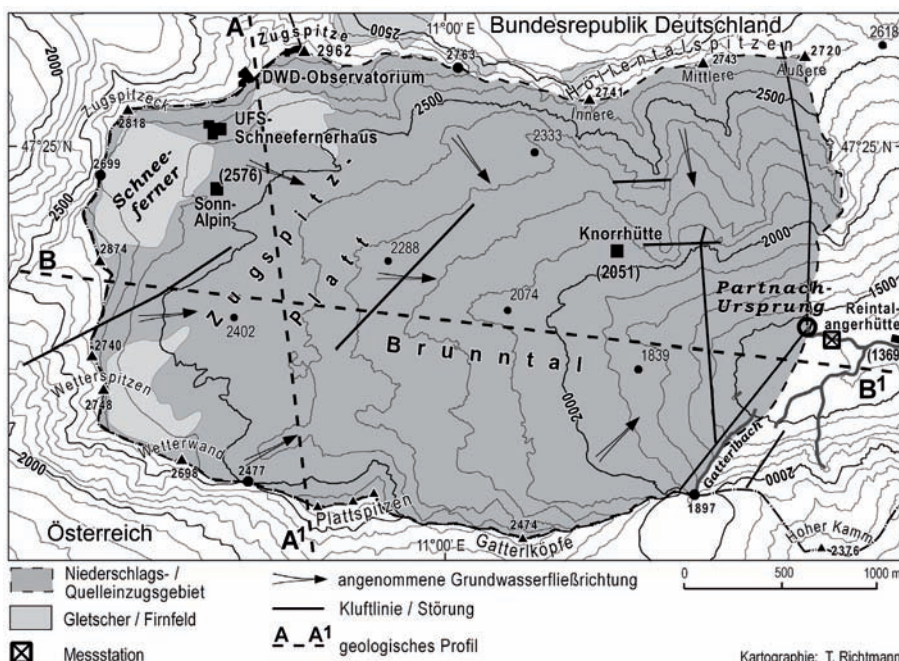


Abbildung 1

Das vermutliche Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs und seine topographischen Verhältnisse
The supposed catchment of the Partnach Spring and the topography of the study area

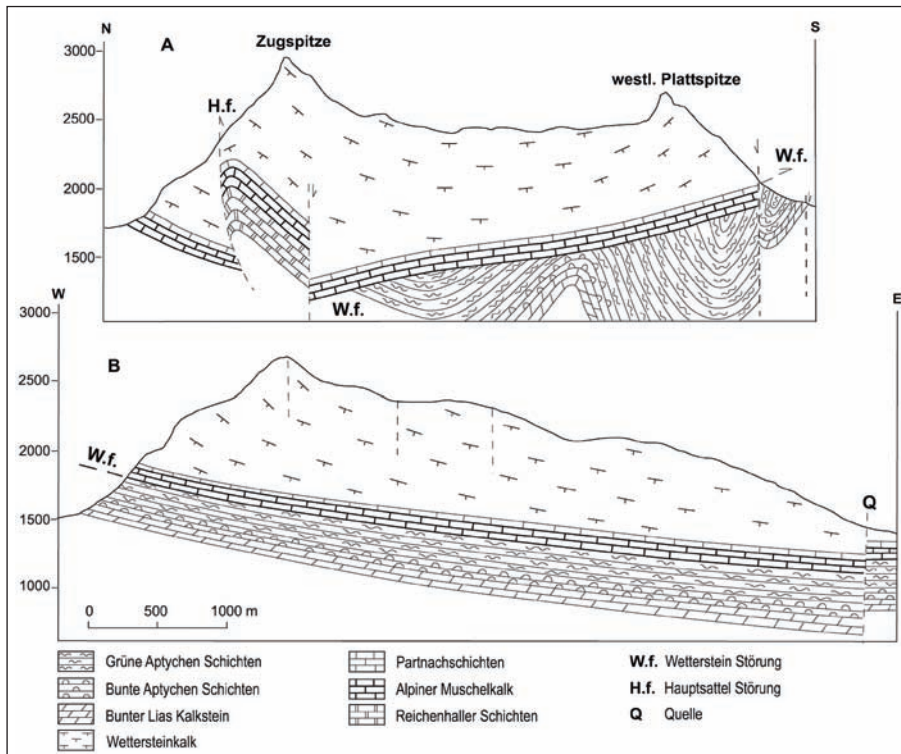


Abbildung 2

Geologische Profile durch das Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs nach ENDRES (1997)
Geological sections across the catchment of the Partnach Spring after ENDRES (1997)

bestätigt auch ein Tracerversuch, der vom Bayerischen Geologischen Landesamt auf dem Zugspitzplatt durchgeführt wurde (WROBEL 1980). Dazu wurde Uranin unterhalb der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus in 2.570 m ü.d.M. eingegeben. Bereits nach 18 h trat der Farbstoff in hoher Konzentration am Partnach-Ursprung wieder aus. Eine vollständige Bilanzierung des Versuchs konnte jedoch wegen zu großer Intervalle bei den Probenahmen und zu spätem Beprobungsbeginn nicht vorge-

nommen werden. GOLDSCHIEDER (2002) führte einen Markierungsversuch im Gebiet der Alpstizze und des benachbarten Höllentales durch. Dabei wurde auch der Partnach-Ursprung beprobt, an dem keine Tracer aus den anderen Gebieten auftraten.

Seit 1996 werden an der Partnach Untersuchungen zur Hydrologie durchgeführt. WETZEL (2004 u. 2005) und auch MORCHE (2006) konnten zeigen, dass die Karstquelle sehr rasch auf Niederschläge reagiert und die Hydrographen der Quellschüttung denen von Oberflächengewässern gleichen. Das Verhältnis von Basisabfluss, Schneeschmelze und durch Niederschlag ausgelösten Hochwasserspitzen zeigt Abbildung 3 am Beispiel des Jahres 1997 deutlich. Der visuell angepasste Basisabfluss steigt im Laufe des Frühsommers, unterbrochen von einer Kälteperiode um Pfingsten, mit der Schneeschmelze an. Die Schneeschmelze hat einen Anteil von ca. 30 % am jährlichen Abfluss und erreicht ihren Höhepunkt im Juli. In der dann folgenden Trockenperiode ist ein Auslaufen des Karstspeichers zu erkennen, der nur vom Schmelzwasserabfluss der Gletscher und einzelnen Niederschlägen überlagert wird. Aus verschiedenen Rezessionsabschnitten konnte durch Aneinandersetzen die Auslaufkurve (Trockenwetterlinie nach RICHTER & LILLICH 1975) des Karstspeichers konstruiert (vgl. WETZEL 2004) und für den letzten gleichmäßig fallenden Abschnitt ohne nennenswerten Schmelzwasserabfluss die Rezessionskonstante $\alpha = 0,059$ sowie das Volumen des Karstspeichers auf $2.782 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ abgeschätzt werden (vgl. MATTHESS & UBELL 2003, S. 123). Die Werte deuten auf ein vergleichsweise langsames Ausfließen des Speichers, vor allem wenn man die erheblichen Reliefunterschiede berücksichtigt. Aufgrund der Unsicherheiten durch Überlagerung mit Schneeschmelzabflüssen wurden die Rezessionskoeffizienten der schnell dränenden Speicher nicht berechnet. Durch Analysen von Schneeschmelzhydrographen mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit als geochemischer Tracer konnten hohe Fließgeschwindigkeiten von bis zu 400 m/h im Karstsystem aufgezeigt werden (WETZEL 2004).

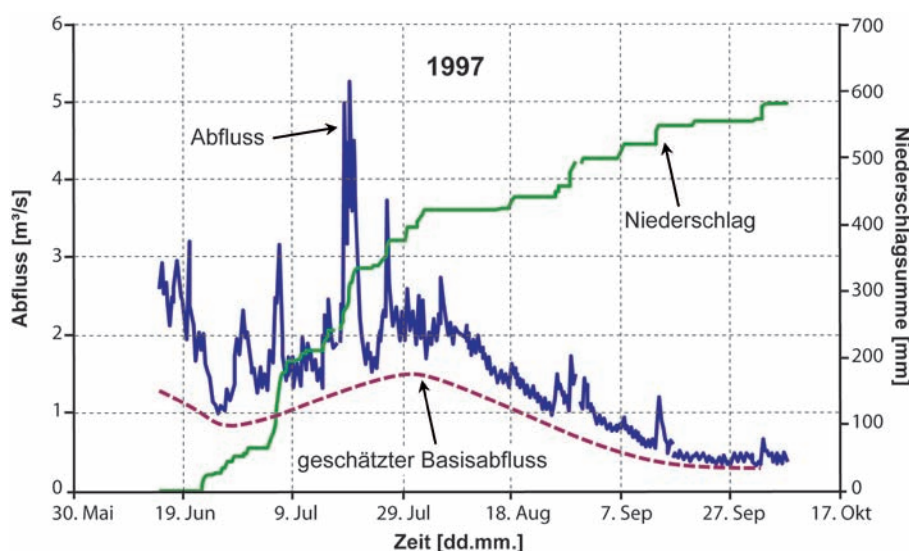


Abbildung 3

Niederschlag, Abfluss und geschätzter Verlauf des Karstspeicher-Abflusses am Partnach-Ursprung am Beispiel des Sommerhalbjahres 1997

Rainfall, total runoff, and the estimated hydrograph of the karst groundwater (basal runoff) at the Partnach Spring in summer 1997

Der DWD betreibt ein Observatorium auf der Zugspitze. Das 30-jährige Niederschlagsmittel der Periode 1961–1990 beträgt 2.003 mm, wobei ein leichtes Maximum der Niederschläge im April festgestellt werden kann (MÜLLER-WESTERMEIER 1996). Die Temperatur

weist im gleichen Zeitraum ein Mittel von $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit dem Maximum von $17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Juli) und dem Minimum von $-32,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Januar) auf. Die genannten Werte gelten für die Zugspitze und können wegen der enormen Relief- und Expositionsunterschiede nicht auf das gesamte Einzugsgebiet übertragen werden.

3 Methodisches Konzept des Markierungsversuches

Der Markierungsversuch wurde als gemeinsames Projekt der Universitäten Augsburg und München (LMU) zusammen mit der Abteilung Geologischer Dienst des LfU durchgeführt. Dabei konnte auf die mehr als 20-jährige Expertise des LfU mit Markierungsversuchen auch im Alpenraum zurückgegriffen werden (vgl. APEL et al. 2005). Für den Markierungsversuch wurden die gut wasserlöslichen Fluoreszenztracer Uranin und Eosin gewählt, da sie toxikologisch unbedenklich sind und auch in starker Verdünnung noch nachgewiesen werden können (vgl. KÄSS 2004). Darüber hinaus zeigen beide Markierungsmittel eine geringe Sorptivität und gelten daher als quasi-ideale Tracer vor allem für Grundwassererkundungen. Einige Eigenschaften der Tracer sollen genauer angesprochen werden, da sie bei der Versuchsdurchführung beachtet werden müssen.

Uranin hat seine maximale Fluoreszenz bei einem pH-Wert von > 9 (BEHRENS 1988). Bei pH 7 ist die Fluoreszenz laut KÄSS (2004) bereits auf 80 % des Maximalwertes gesunken. Mit sinkendem pH-Wert sinkt auch die Fluoreszenzintensität weiter ab. Dieser Effekt ist jedoch nach Untersuchungen von BEHRENS (1988) reversibel. Die starke pH-Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität und die Lichtempfindlichkeit von Uranin sind bei der quantitativen Analyse unbedingt zu beachten, da sonst erhebliche Fehler auftreten können. Unter optimalen Bedingungen liegt die spektralfluorimetrische Nachweisgrenze von Uranin nach SCHUDEL et al. (2002) bei $0,001\text{ mg/m}^3$ und darunter.

Die Eigenschaften von Eosin unterscheiden sich nicht signifikant von denen des Uranins. Allerdings ist die Lichtempfindlichkeit gegenüber Uranin erhöht, dagegen kann die starke pH-Wert-Abhängigkeit nicht beobachtet werden (BEHRENS 1988).

Die quantitative Analyse der Tracer erfolgte im Fluoreszenzlabor des LfU Bayern mit dem Fluoreszenz-Spektralphotometer HITACHI F 3010 im Synchron-Scan-Verfahren. Für beide Tracer wurden Kalibrierlösungen – mit Partnach-Wasser (pH 8), angesäuert und alkalisiert – mit Verdünnungen von 10^{-2} bis 10^{-9} g/l angesetzt. Beim gesamten Lagerungs- und Analyseprozess wurde streng auf Dunkelheit geachtet, da beide Farbstoffe sehr empfindlich auf Sonnenlicht reagieren.

Ein wichtiges methodisches Problem ergibt sich bei der gleichzeitigen Verwendung von Uranin und Eosin, da sich die Wellenlängen der maximalen Emission überlagern. Eine Trennung der beiden Spektralkurven kann nach KÄSS (2004) auf analytischem oder rechnerischem Wege erfolgen. BEHRENS (1988) empfiehlt eine Trennung der Tracer durch Ansäuerung der Proben, da so die Emission von Uranin unterdrückt werden kann ohne den Tracer irreversibel zu zerstören.

Zur spektralfluorimetrischen Analyse wurden die Proben zunächst nach Probennahmeorten sortiert und danach chronologisch sowie ohne Vorbehandlung gemessen. Proben mit sichtbarer Färbung

wurden 1:10 bzw. 1:100 verdünnt. Bei Überlagerungen der Kurven wurden die Proben mit 10 %iger Essigsäure angesäuert. Proben mit niedrigen Uraninkonzentrationen wurden noch einmal alkalisiert gemessen. Die erhaltenen Werte konnten mithilfe der Kalibrierreihen auf die Konzentrationen umgerechnet werden. Da sich eine leichte Abhängigkeit der Emission vom pH-Wert auch für das hier verwendete Eosin zeigte, wurden auch für die angesäuerten Proben Kalibrierkurven erstellt.

Für die Eingabe der Tracer wurden bei einer Vorbegehung zwei geeignete Lokalitäten gefunden. Neben einem guten Anschluss an das karsthydrologische System über entsprechende Schlucklöcher oder Dolinen wurde auf eine ausreichende Wassermenge von mindestens 1 l/s geachtet, um das Einspülen der Tracer zu gewährleisten. Die Eingabe des Eosins erfolgte im Schmelzwasserablauf des nördlichen Schneefeners (vgl. Abb. 4), allerdings konnte aufgrund von Neuschnee am Eingabetag nicht in direkter Nachbarschaft eines Schluckloches eingegeben werden. Wie anhand der Schnee verfärbung nachvollzogen werden konnte, versickerte das markierte Wasser nach kurzer Laufstrecke vollständig in den Untergrund. Unter wesentlich günstigeren Bedingungen konnte das Uranin mit Hilfe von Schmelzwasser eines Schneeflecks im Bereich unterhalb der Plattspitzen (Abb. 3) östlich des südlichen Schneefeners bei gutem Wetter in eine Kluft gespült werden. Die Eingabemengen wurden nach den Erfahrungen aus dem von WROBEL (1980) vorgenommenen Markierungsversuch und den vorliegenden hydrologischen Erkenntnissen abgeschätzt.

Die räumliche Verteilung der Beprobungspunkte und das Design des Probeplans stellen bei Markierungsversuchen einen der wichtigsten methodischen Schritte dar, da nur bei einer optimalen Beprobung die Wege des Wassers im Untergrund wirklich erfasst werden können (vgl. KÄSS 2004 oder LEIBUNDGUT et al. 2009). Im Hochgebirge stellt sich auch ein logistisches Problem, da nicht alle Beprobungspunkte über öffentliche Straßen oder das forstliche Wegenetz zu erreichen sind. Unter hydrogeologischen und logistischen Gesichtspunkten wurden insgesamt 14 Beobachtungsstellen ausgewählt. Zum Beginn des Markierungsversuches standen Studierende der Geographie (LMU) für die zeitlich hoch aufgelöste Probennahme zur Verfügung, ohne die der Versuch nicht zu realisieren gewesen wäre.

Einen Überblick über die Lage der Beprobungspunkte liefert Abbildung 4. Der Schwerpunkt der Beprobung lag dabei am Partnach-Ursprung und dem darunter folgenden Laufabschnitt der Partnach. Hier wurde an drei Entnahmepunkten zunächst in einem zeitlichen Intervall von 30 Minuten beprobt. Am Partnach-Ursprung wurden darüber hinaus Abflüsse an einer Pegelstation für die quantitative Auswertung des Versuchs gemessen. Die Pegelraten wurden freundlicherweise von D. Morche (Institut für Geographie der Universität Halle) zur Verfügung gestellt. Neben der Partnach wurden die Gewässer entlang der Gatterl-Störung auf österreichischer Seite beprobt. Hier konnte mit Hilfe eines automatischen Probennehmers, der ebenfalls von der Universität Halle bereitgestellt wurde, eine Beprobung im 4 h-Rhythmus realisiert werden. Die übrigen Entnahmestellen wurden so verteilt, dass alle Oberflächengewässer der Umgebung erfasst werden konnten. Darüber hinaus erfolgten Probennahmen im Bereich von ufernahen Wasseraustritten am Eibsee und unterhalb der Christelquellen östlich des Eibsees. Innerhalb des angenommenen Einzugsgebietes des Partnach-Ursprungs wurden aus logisti-

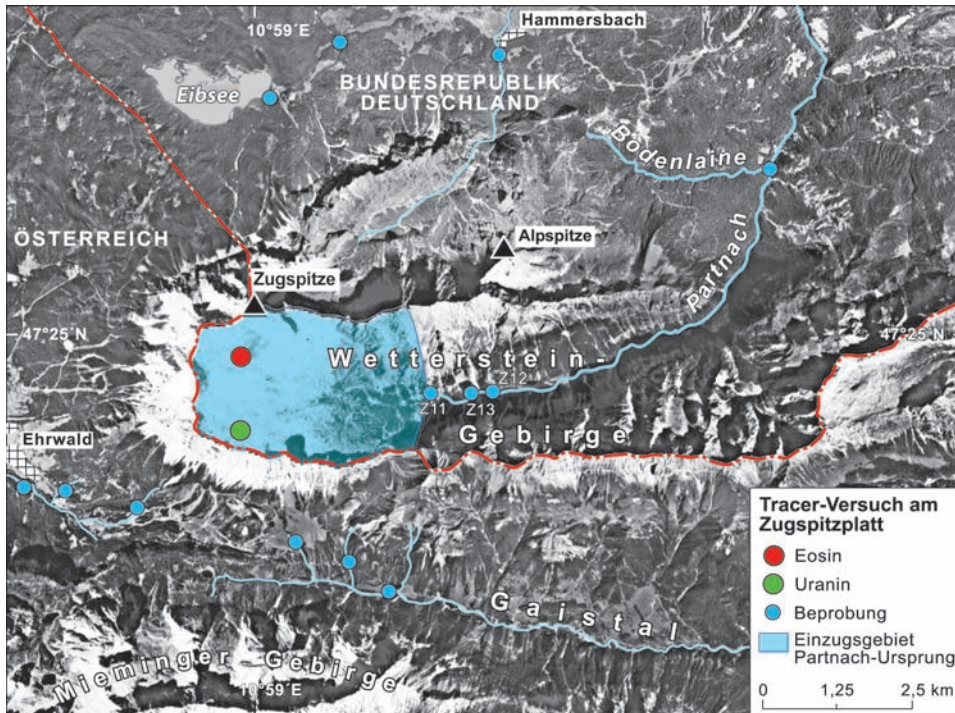


Abbildung 4

Die Lage der Eingabestellen für die Tracer Uranin und Eosin und die Beprobungspunkte an den Gewässern um das Zugspitzgebiet

The locations of tracer input (Uranin and Eosin) and sampling points on the water courses around the investigation area

schen Gründen keine Proben genommen. Die Beprobungsintervalle wurden an allen Messstellen im Laufe des Versuches zunächst sukzessive verlängert, bis schließlich nur noch in unregelmäßigen Abständen Wasserproben entnommen wurden.

Die Gewässer des Versuchsgebietes wurden während des Markierungsversuches auf ihre physikochemischen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst und zei-

gen für alle Gewässer ein einheitliches Bild. Die Temperaturen und auch die elektrische Leitfähigkeit nehmen mit der Höhe ab (vgl. PROSL 1985), die Temperatur wird darüber hinaus noch von der Umgebung beeinflusst. Höhere Leitfähigkeiten werden dort gemessen, wo Lockergesteine auftreten.

4 Ergebnisse des Markierungsversuches

Die Eingabe der Farbstoffe erfolgte am 16. und 17.8.2005 durch Mitarbeiter des LfU unterstützt von Studenten der Universität Augsburg. Am 16.8. wurden ab 14.20 Uhr 10 kg Eosin vorgelöst in ca. 100 l Wasser über eine Stunde hinweg dem Schmelzwasser (ca. 2 l/s) am nördlichen Schneeferner zugegeben, so dass der Farbstoff mit ca. 7 m³ Wasser eingespült werden konnte. Da sich aufgrund von Schneeniederschlägen am Vortag eine geschlossene Schneedecke entwickelt hatte, konnte nicht direkt an einem Schluckloch eingegeben werden.

Die Eingabe des Uranins (5 kg) wurde am 17.8. ab 11.15 Uhr bei sonnigem Wetter direkt an einer Kluft vorgenommen. Hier stand für die Einspülung der Abfluss (ca. 1 l/s) eines schmelzenden Schneefeldes zur Verfügung. Auch das Uranin wurde vorgelöst und über einen Zeitraum von ca. 14 Minuten eingegeben.

Der Abfluss an der Beprobungsstelle Z 11 lag zur Zeit der Tracer-eingabe mit 2 m³/s im Bereich mittlerer Werte (Abb. 6). Die weiteren Witterungsverhältnisse während des Markierungsversuches waren ungewöhnlich. Ab dem 19.8. setzten Niederschläge ein, die mit kurzen Unterbrechungen bis zum 22.8.2005 anhielten und dann in den extremen Niederschlag vom 22. und 23.8.2005 übergingen, der zu einem katastrophalen Hochwasser in weiten Teilen Süddeutschlands führte.

Nach eigenen Messungen an der Messstelle Z 11 fielen innerhalb von 36 Stunden ca. 235 mm Niederschlag, die zu den höchsten bislang gemessenen Abflüssen (> 16 m³/s) im Gebiet führten (Abb. 6). Die folgenden Monate, vor allem Oktober und November, waren vergleichsweise trocken, so dass im Verlauf des Tailings der typische herbstliche Speicherauslauf zu beobachten war (vgl. Abb. 7). Ab dem 15.11. wurden die Probenahmen am Partnach-Ursprung aus Sicherheitsgründen (Lawinengefahr) bis zum Frühjahr unterbrochen.

Tabelle 1

Physikochemische Parameter der Gewässer an den Probennahmestellen
Physical and chemical characteristics of the waters at different sampling points

Beobachtungsstelle	Temperatur [°C]	pH-Wert	el. Leitf. [µS/cm]	Sauerstoff [mg/l]	Bemerkung
Ursprung (Z11)	3,3	8,4	133	12,2	Quelle
Partnach (Z12)	4,4	8,2	208	10,3	Bachbett
Gsundbrünnl (Z13)	4,3	8,3	170	10,7	Quelle
Bodenlaine	3,1	8,4	284	12,0	Bachbett
Hammersbach	3,8	8,3	178	12,1	Bachbett
Zypermühle	4,9	8,4	216	11,2	Bachbett
Wiesltalbach	5,9	8,3	276	10,6	Bachbett
Rappenbach	5,5	8,5	350	10,7	Bachbett
Gaisbach Brücke	4,9	8,4	208	11,2	Bachbett
Gaistal Bach	2,3	8,5	285	11,3	Bachbett
Hochissen Bach	2,1	8,4	238	11,3	Bachbett
Christlquelle	6,9	7,9	306	10,6	Quelle
Eibsee	8,6	8,4	226	10,1	See

Eines der wichtigsten Ziele des Markierungsversuches war es nachzuweisen, ob Grundwasser aus dem Bereich des Zugspitzplatts auch in benachbarten Gebieten austritt. Nach dem vorliegenden Versuch kann bei Eingabe von Markierungsmitteln im Nordwesten und Südwesten des Einzugsgebietes ein solcher Wasserübertritt ausgeschlossen werden. Sowohl Eosin als auch Uranin konnten nur am Partnach-Ursprung und den beiden Beprobungspunkten wenige 100 m unterhalb des Quelltopfes nachgewiesen werden. Hier lagen die Konzentrationen der Markierungsmittel so hoch, dass während des Konzentrationsgipfels die Sichtbarkeit der Farbstoffe erreicht wurde. An keiner anderen Messstelle außerhalb des Gebietes konnten auch nur Spuren der Markierungsmittel nachgewiesen werden, obwohl über 11 Monate hinweg Wasserproben genommen wurden. Auch während des extremen Hochwassers am 22. und 23.8.2005 konnte die Beprobung aufrecht erhalten werden. Selbst in dieser Zeit mit außerordentlich hohem Füllungsstand des Karstsystems, bei dem sicherlich sonst nicht aktive Leitbahnen der vadosen Zone benutzt wurden (vgl. ZÖTL 1974), konnten keine Übertritte von Karstwasser in benachbarte Gebiete festgestellt werden.

Die Beprobungsstelle Z 12 liegt an der Partnach ca. 400 m unterhalb des Partnach-Ursprungs (Z 11). Hier wurde direkt Wasser aus dem Bach geschöpft, so dass ein gleichsinniger Verlauf der Tracerkonzentrationen an diesen beiden Beprobungspunkten zu erwarten war. Bei der etwas flussaufwärts von Z 12 gelegenen Messstelle Z 13 handelt es sich um eine orographisch links gelegene Hangquelle in Lockergesteinen (Gsundbrünnl). Nach Analysen des LfU ist in dem Quellwasser Radon enthalten, welches auf einen Austritt von echtem Grundwasser deutet. Allerdings liegen im Bereich zwischen Partnach-Ursprung und dem Quellaustritt alte Bergsturmassen. Es ist anzunehmen, dass Wasser aus der Partnach unterhalb des Ursprungs im Bachbett versickert und unter den Sturmassen abfließt. Offenbar liegt unter den Sturmassen auch eine Quelle, deren radonhaltiges Wasser sich mit dem versickerten Partnachwasser mischt und am Gsundbrünnl (Z 13) austritt. Ein eigenständiger Austritt von Markierungsmitteln an der Entnahmestelle Z 13 erscheint daher unwahrscheinlich.

Der Konzentrationsverlauf für beide Tracer soll am Beispiel der Messstelle Z 11 vorgestellt und diskutiert werden. Wie Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen, weisen die Konzentrationsver-

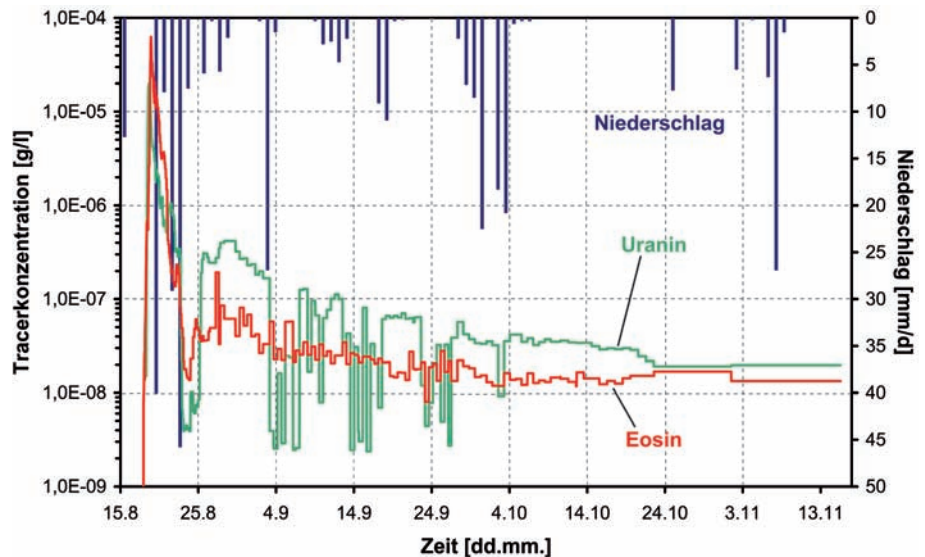


Abbildung 5

Der Verlauf der Tracerkonzentrationen von Eosin und Uranin am Beprobungspunkt Partnach-Ursprung (Z 11) sowie die Niederschläge während der intensiven Beprobungsphase nach Daten der Station Zugspitze des DWD

Precipitation after data of the meteorological station of the German Meteorological Service (DWD) at the Zugspitze and concentration curves of Eosin and Uranin at the sampling point Z 11 (Partnach Spring) during the period of intensive sampling

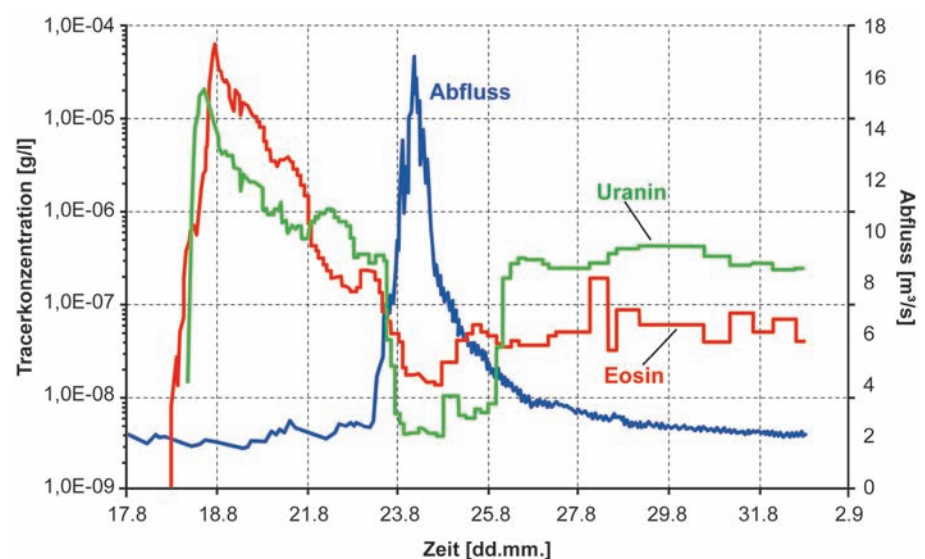


Abbildung 6

Der Abfluss und der Verlauf von Tracerkonzentrationen während des extremen Ereignisses vom 22. bis 23.8.2005

Runoff and tracer-concentration curves during the extreme rainfall event between 22 and 23 August 2005

läufe von Eosin und Uranin deutliche Gemeinsamkeiten, aber auch klare Unterschiede auf. Beide Kurven zeigen einen sehr steilen Anstieg, der durch den raschen advektiven Transport im Karstsystem erklärt werden kann. Dabei ist die Zeit zwischen Eingabe und erstmaligem Nachweis am Partnach-Ursprung bei Uranin mit 20 h 30 min deutlich kürzer als bei Eosin mit 32 h (vgl. Tab. 2). Die Ursache für die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten kann im Karstsystem selbst begründet sein. Es ist jedoch auch möglich, dass durch die verstärkten Schmelzprozesse mit höheren Abflüssen am 17.8. bessere Transportverhältnisse gegeben waren als am Tage zuvor. Daher kann die Frage nach den Ursachen für die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten

Tabelle 2

Die wichtigsten Kenndaten des Markierungsversuches, unterteilt nach Tracern und Beprobungspunkten (A = Distanz zur Eingabestelle [m], B = maximale Abstandsgeschwindigkeit, mittlere Abstandsgeschwindigkeit (nach SAUTY 1977) [m/h], C = Zeit bis zum ersten Nachweis [hh:mm], D = mittlere longitudinale Dispersivität α_L [m] nach Multidispersionsmodell, n.b. = nicht berechnet).
Basic data of the tracer test, sorted for tracers and sampling points (A = distance to the injection point [m], B = maximum and mean field velocity [m/h] (after SAUTY 1977), C = time to the first detection [hh:mm], D = mean longitudinal dispersion α_L calculated by a multi-dispersion model, n.b. = not calculated).

Eingabe	Nördl. Schneeferner Eosin 2.597 m ü.d.M.				Südl. Schneeferner Uranin 2.399 m ü.d.M.			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Partnach-Ursprung (Z 11) 1.390 m ü.d.M.	4.155	130 67,8	32:00	41,4	3.510	171 104,2	20:30	189
Partnach (Z 12) 1.338 m ü.d.M.	4.754	143	33:15	n.b.	4.151	195	21:15	n.b.
Gsundbrünnl (Z 13) 1.345 m ü.d.M.	4.709	85	55:15	n.b.	4.104	116,4	35:15	n.b.

Der Einfluss des extremen Abflusses um den 22.8. auf die Konzentrationsverläufe der beiden Tracer ist unterschiedlich. Während die Eosinkurve eine Verdünnung von ca. einer 10er-Potenz erfährt und die Kurve dann mit vergleichsweise geringen Schwankungen bis zum Ende des Beprobungszeitraumes abfällt, erfolgt im Uranin-System eine Verdünnung von nahezu zwei 10er-Potenzen (vgl. Abb. 6). Aber auch das Uranin-System erreicht nach dem Ende des Ereignisses wieder Konzentrationen in Höhe des Ausgangsniveaus, so dass Verdünnungseffekte als Ursache für die Konzentrationsrückgänge anzunehmen sind. Auch die im weiteren Verlauf des Tailings zu beobachtenden Einbrüche vor allem der Uraninkonzentrationen können mit Verdünnungsprozessen in Folge von Niederschlagsereignissen oder

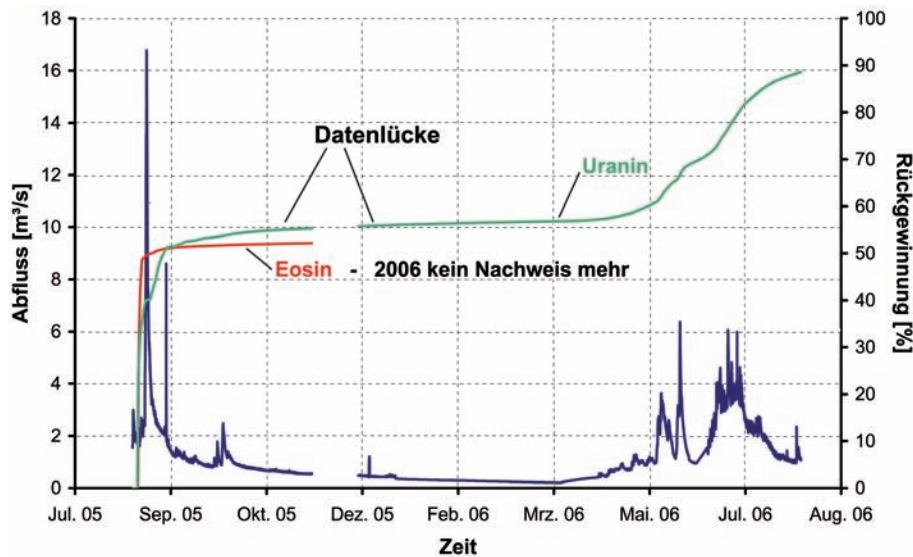
nicht eindeutig beantwortet werden, zumal bei dem 1980 durchgeführten Versuch Uranin in weniger als 18 h vom nördlichen Schneeferner aus den Partnach-Ursprung erreichte. Auch die Analyse von elektrischen Leitfähigkeiten während der Schneeschmelze deutet auf potentiell höhere Abstandsgeschwindigkeiten im Karstsystem (vgl. WETZEL 2004).

Der klar ausgeprägte Scheitelbereich beider Tracerdurchgänge dauert nur wenige Stunden. Die dabei erreichten verschiedenen Konzentrationsniveaus sind durch die unterschiedlichen Eingabemengen zu erklären. Berücksichtigt man jedoch, dass nur 5 kg Uranin gegenüber 10 kg Eosin eingegeben wurden, ist der konvektive Transport im südlichen Bereich des Karstsystems (Uranin) stärker ausgeprägt. Auch hier sind witterungsbedingte Einflüsse nicht auszuschließen. Während des Konzentrationsgipfels war die Umgebung der Uranin-Eingabestelle weitgehend aper. Zur gleichen Zeit lag an der Eosin-Eingabestelle noch Schnee, in dem noch gewisse nicht genau abzuschätzende Farbstoffmengen gespeichert waren, die dann sukzessive in das Karstsystem gespült wurden. Nach dem Gipfel sinken die Tracerkonzentrationen im Abfluss mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Während beim Eosin der breite Gipfelbereich etwa drei Tage bis zum 23.8. dauert und dann das Tailing mit zunehmend dispersivem Transport einsetzt, beginnt das Tailing beim Uranin schon erheblich eher (19.8.). Interessant erscheint der Zeitraum zwischen 21.8. und 22.8. vor dem Einsetzen der intensiven Niederschläge. Hier ist ein gegenläufiges Verhalten der beiden Konzentrationsverläufe zu beobachten. Während die Eosinkonzentration markant abnimmt, ist ein Konzentrationsanstieg des Uranins zu beobachten. In diesem Zeitraum fielen nach Angaben des DWD etwa 40 mm Niederschlag, an der eigenen Messstation wurden dagegen nur 28 mm registriert, so dass eine ungleichmäßige Beregnung oder auch eine schwankende Schneegrenze während des Niederschlags zu den Konzentrationsschwankungen geführt haben kann. Danach folgt ein markanter Konzentrationseinbruch in Folge des Extremereignisses und schließlich das anhaltende Tailing mit dispersivem Transport und weiter abfallenden Konzentrationen. Unterbrochen wird die fallende Kurve von markanten Konzentrationsschwankungen in Folge von einzelnen Niederschlags- oder Schmelzereignissen.

Schmelzwasserabflüssen aus den Hochlagen erklärt werden. Mit Hilfe des Gradtagverfahrens auf Basis von Temperaturdaten an der Zugspitze konnte ein deutlicher Zusammenhang von Konzentrationsabfällen mit hohem Schmelzwasseraufkommen nachgewiesen werden.

Beide Tracer waren bis zur letzten Probennahme am 15.11. im Jahr 2005 noch nachzuweisen. Nach der witterungsbedingten Winterpause wurden im Mai 2006 die ersten Proben genommen, in denen nur noch Uranin vertreten war. Auch bei weiteren Beprobungen bis Ende Juli 2006 wurde jeweils nur Uranin nachgewiesen. Aufgrund von Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze wurde der Tracerversuch mit der Beprobung vom Juli 2006 beendet. Das Tailing war damit für den südlichen Bereich des Zugspitzplatts deutlich ausgeprägter. Ob dies nur auf die günstigeren Eigenschaften des verwendeten Uranins im alkalischen Milieu zurückzuführen ist, oder ob die karsthydrologischen Verhältnisse hier ebenfalls eine Rolle spielen, muss letztendlich offen bleiben.

Für beide Tracer war es möglich, die Rückgewinnung abzuschätzen, da die Pegelstation am Partnach-Ursprung durchgehend Daten aufgezeichnet hat. Die Datenqualität während des Winters war allerdings mangelhaft, während dieser Zeit ist jedoch allenfalls von geringen Abflüssen auszugehen. Die meiste Zeit ist der Abfluss aufgrund von strengem Frost in dem sehr schattigen alpinen Tal unterbrochen. Wie Abbildung 7 zeigt, werden von beiden Tracern sehr rasch große Mengen aus dem System gespült. Bis zum Beginn des Tailings nach dem Konzentrationsgipfel sind jeweils etwas mehr als 50 % der Eingabemenge abgeflossen, so dass ungefähr die Hälfte der Farbstoffe für längere Zeit im Karstsystem verbleibt. Vom Eosin werden in den folgenden Wochen nur noch unbedeutende Mengen ausgetragen. Aufgrund der höheren Uraninkonzentrationen zum Beginn des Tailings und vor allem auch nach dem Ende des Winters erfolgt für diesen Tracer noch weiterhin ein deutlicher Austrag. Mit dem Ende des Tracerversuchs wurden schließlich ca. 90 % des Uranins quantitativ im Abfluss erfasst.

**Abbildung 7**

Abfluss und Summenkurve des Tracerdurchgangs für die Farbstoffe Uranin und Eosin
 Runoff and cumulative load curves of Uranin and Eosin

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Frage, ob das Gebiet hydrologisch abgeschlossen ist, kann seit dem Markierungsversuch besser beantwortet werden. Ganz offensichtlich gibt es aus dem oberen Bereich des Partnachgebietes keinen Übertritt von Wasser in andere Einzugsgebiete. Vor allem konnte gezeigt werden, dass die Gatterl-Störung im Südosten des Zugspitzplatts keine hydrologische Leitlinie im Bereich des Karstkörpers für einen Wassertransport in das südlich angrenzende Gaistal darstellt. Dies gilt auch bei hohem Füllungsstand des Karstkörpers, der während des Versuches durch das extreme Ereignis erreicht worden ist. Ob allerdings eine oberflächennahe karsthydrologische Verbindung in direkter Nähe zur geologischen Struktur auftritt, lässt sich mit diesem Markierungsversuch nicht beurteilen. Ähnliches gilt auch im nordöstlichen Bereich des Zugspitzplatts. Hier tritt z.B. eine Quelle in der Nähe der Knorr-Hütte auf, deren Einzugsgebiet bisher nicht bekannt ist. Zahlreiche Schlucklöcher und Schachtdolinen befinden sich ebenfalls in diesem Gebiet. Auch hier wäre ein weiterer Markierungsversuch notwendig, um endgültige Klarheit über die hydrogeologischen Verhältnisse zu erlangen. Insgesamt ist die Aussage von ORTH (1984) immer noch gültig, wonach die Entwässerung des Zugspitzplatts der geologischen Synklinalstruktur mit ostwärts gerichtetem Einfallen der Faltenachse folgt. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommt auch LEIBUNDGUT (1995, S. 96) für das Alpsteingebiet, wo die geologischen Strukturen ebenfalls zu einer Ausrichtung der Entwässerung führen. Mit gewissen Einschränkungen weist er auf die Möglichkeit einer Verallgemeinerung dieser Erkenntnis hin.

Welche Rückschlüsse aus den Konzentrationsverläufen lassen sich für das Karstsystem ziehen? Hier ist insbesondere die Rückkehr zu den Ausgangswerten auch nach starken Niederschlägen oder Schmelzereignissen von Interesse. Wenn es bei erhöhten Abflüssen im Karstsystem zwar zu Konzentrationseinbrüchen, nicht aber zu einer nennenswerten Auswaschung der Tracer kommt, so können dafür verschiedene Erklärungsansätze gefunden werden.

- Bei erhöhten Abflüssen im Karstsystem werden andere Wege benutzt als die, in die das Markierungsmittel eingegeben wurde. Es findet ein Bypass des Abflusses statt.
- Durch den erhöhten Abfluss in Folge der extremen Niederschläge kam es zu einer Verdrängung des Markierungsmittels in feine Klüfte und Poren, aus denen die Abgabe dann sehr langsam und kontinuierlich erfolgt. Während der Hochwassersituation wird nicht mehr Markierungsmittel abgegeben als bei niedrigen Wasserständen.
- Die Farbstoffe sind sehr schnell in die phreatische Zone gelangt, die wie ein großer Puffer wirkt. Auch in diesem Fall kommt es zu einer nur langsamen, aber stetigen Abgabe der Markierungsmittel und im Fall von erhöhten Abflüssen zu einer Konzentrationsabnahme. Für diese Annahme

sprechen die niedrige Rezessionskonstante der langsamen Abflusskomponente und das vergleichsweise hohe Speichervolumen des Karstaquifers.

Vergleicht man die beobachteten Abstandsgeschwindigkeiten mit Angaben anderer Markierungsversuche in den Kalknordalpen, so liegen die Werte etwa im Durchschnitt (vgl. Tab. 3). Besonders hohe Geschwindigkeiten wurden von LEIBUNDGUT (1995) im Karstgebiet des Alpsteins (Säntisgipfel) bei ähnlichen Reliefverhältnissen ermittelt. Im Steinernen Meer (Funtensee, Grünsee und Salzgrabenhöhle) wurden im Rahmen eines größeren Markierungsversuches ebenfalls sehr hohe Abstandsgeschwindigkeiten gemessen (vgl. APEL et al. 2005, MALOSZEWSKI et al. 2005), wobei kleinräumig große Unterschiede auftraten. Dies gilt auch für die Untersuchungen am Alpstein durch LEIBUNDGUT (1995) bzw. von LEIBUNDGUT & VONDERSTRASS (1997) im Gebiet der Churfürsten. Im Wettersteingebirge bestimmte GOLDSCHIEDER (2002) niedrige Abstandsgeschwindigkeiten im direkt benachbarten Alpsteingebiet. Die großen Unterschiede auf engem Raum lassen sich durch die unterschiedlichen tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse erklären. Im Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs folgt das Wasser ähnlich wie im Gebiet des Alpsteins den geologischen Strukturen (Faltung und Schichtung) im Untergrund (vgl. LEIBUNDGUT 1995) und hat dort offenbar im Laufe der Zeit ein gut entwickeltes Karstsystem geschaffen, in dem hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten können. Die auch auf dem Zugspitzplatt mächtige vadosa Zone konnte aufgrund des kontinuierlich fließenden Wassers während und nach der Eingabe rasch durchlaufen werden. An der Alpspitze hingegen muss das Wasser im Untergrund die geologischen Strukturen queren. GOLDSCHIEDER (2002) konnte zeigen, dass das Karstsystem in diesem Gebiet auch weniger gut entwickelt ist. Das Gebiet wurde seit dem Ende des Tertiärs so rasch gehoben, dass trotz humider Klimabedingungen und reinem Kalkstein die Entwicklung eines reifen Karstes im Untergrund nicht Schritt halten konnte und die gut entwickelte alte Karstlandschaft an der Oberfläche konserviert wurde.

Tabelle 3

Abstandsgeschwindigkeiten, mittlere longitudinale Dispersivitäten und Rückgewinnungsraten im Vergleich mit anderen ausgewählten Tracerstudien in den Kalknordalpen

Field velocities, mean longitudinal dispersion, and tracer recoveries from different dye tracer studies in the northern Limestone Alps

Gebiet	Autor	Tracer	Geschwindigkeiten v [m/h]	Dispersivitäten α_l [m]	Rückgewinnung [%]
Zugspitzplatt	diese Studie	Eosin	130 ¹	5,8–18,1	> 52
Zugspitzplatt	diese Studie	Uranin	171 ¹	12–151	> 90
Zugspitzplatt	WROBEL 1980	Uranin	> 200 ¹	k.A.	20
Alpspitze	GOLDSCHIEDER (2002)	Uranin	8,1–10,7 ²	k.A.	19,5
Hoher Ifen	GOLDSCHIEDER (2002)	Uranin	100–176 ³	15,7–24,5	91
Hoher Göll	MALOSZEWSKI et al. (2005)	Uranin	4,2–44,2 ²	10–120	24,0
Funtensee	MALOSZEWSKI et al. (2005)	Eosin	82,0–275,0 ²	10–50	1,0
Grünsee	MALOSZEWSKI et al. (2005)	Uranin	275,0–655,0 ²	35–44	1,0
Salzgrabenhöhle	MALOSZEWSKI et al. (2005)	Uranin	47,0–182,0 ²	8–12	7,0
Säntisgipfel	LEIBUNDGUT (1995)	Rhodamin	408 ¹	k.A.	33,0

¹ gemessene maximale Abstandsgeschwindigkeit

² mit Multidispersionsmodell berechnete Abstandsgeschwindigkeiten

³ gemessene maximale Abstandsgeschwindigkeit an verschiedenen Austrittspunkten

Ebenso weisen die Rückgewinnungsraten und die errechneten longitudinalen Dispersivitäten auf die gute Wasserwegigkeit im Karst des Zugspitzgebietes hin. Auch wenn während des Winters 2005/06 keine Proben genommen und kein Abfluss bestimmt werden konnten, liefert die konservative Abschätzung der Rückgewinnung für das Uranin Werte von über 90 %. Eosin wurde im Frühjahr 2006 nicht mehr nachgewiesen, so dass die gesicherte Rückgewinnung nur bei > 52 % liegt. Unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Tracereigenschaften deuten die vergleichsweise hohen Raten beider Tracer einerseits auf ein gut entwickeltes Karstsystem mit guter Durchlässigkeit. Andererseits wird vor allem durch den hohen Wert beim Uranin klar angezeigt, dass über den Partnach-Ursprung der größte Teil der Entwässerung des Zugspitzplatts erfolgt. Allenfalls für geringe Wassermengen besteht die theoretische Möglichkeit eines unterirdischen Übertritts in ein anderes Quelleinzugsgebiet oder die der Tiefenversickerung. Doch auch die von WETZEL (2004) vorgestellten hydrologischen Bilanzen weisen darauf hin, dass keine signifikanten Wasserverluste auftreten. Die teilweise sehr niedrigen Rückgewinnungsraten der Versuche in den Berchtesgader Alpen (vgl. MALOSZEWSKI et al. 2005) sind vor allem in den vielfältigen Fließwegen im Untergrund zu suchen, so dass durch die Beprobungen nur ein Teil des markierten Karstwassers erfasst wurde.

Die longitudinalen Dispersivitäten liegen für den Karst des Zugspitzgebietes in der gleichen Größenordnung wie in den anderen kalkalpinen Untersuchungsgebieten (vgl. Tab. 3). Vor allem der minimale Wert der longitudinalen Dispersivität, der durch den raschen Abfluss in den Karstwasserleitern hervorgerufen wird, deutet wieder auf gut entwickelte Karstsysteme im Untergrund. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Vorbegehung des Gebietes bestätigt. Hierbei konnten neben zahlreichen Schlucklöchern und Dolinen auch durch Lösungsprozesse aufgeweitete Kluftsysteme von über 1 m lichter Weite im Tunnel der Zahnradbahn zum Zugspitzplatt beobachtet werden. Darüber hinaus sind vom LfU Bayern einzelne, allerdings nicht weit zu verfolgende Höhlensysteme auf dem Zugspitzplatt bekannt.

Hohe Dispersivitäten in der langsamen Flusskomponente treten beim Uranin auf, was auf Anteile mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten und diffusen Fließwegen im Untergrund in Verbindung gebracht werden kann. Diese Komponente wurde für den Fließweg des Eosins nicht nachgewiesen, was auch auf die schlechtere Nachweisbarkeit dieses Tracers zurück zu führen ist.

6 Zusammenfassung

Im Bereich des Zugspitzplatts wurde in der Zeit von August 2005 bis Juli 2006 ein Grundwassermarkierungsversuch mit dem Ziel durchgeführt, das Quelleinzugsgebiet des Partnach-Ursprungs abzugrenzen. Dazu wurden die Fluoreszenztracer Uranin und Eosin in das Karstsystem eingegeben. Eine Beprobung mit hoher zeitlicher Dichte wurde an allen betroffenen Quellen und Flüssen durchgeführt. Diese konnte auch während des extremen Hochwassers vom August 2005 an den wichtigsten Beprobungsstellen sichergestellt werden. An der Karstquelle Partnach-Ursprung wurden die Abflüsse mit einer Pegelanlage kontinuierlich registriert. Der Versuch erbrachte keine Hinweise, dass nennenswerte Wassermengen aus dem Niederschlagsgebiet des Partnach-Ursprungs im Untergrund in benachbarte Gebiete übertreten. Dies betrifft insbesondere auch eine tektonische Störung (Gatterl Störung) im Südosten des Gebietes, die als potentielle hydrogeologische Leitlinie für einen Abfluss in das südlich angrenzende Gaisalp in Frage kommt. Hohe Abstandsgeschwindigkeiten und Rückgewinnungsraten der Tracer sowie eine geringe longitudinale Dispersivität der schnellen Fließkomponente indizieren ein gut entwickeltes Karstsystem im Bereich des Zugspitzplatts. Weitere Markierungsversuche insbesondere an der östlichen Gebietsgrenze sind notwendig, um genauere Kenntnisse von den hydrogeologischen Verhältnissen in diesem Bereich zu erlangen.

Summary

A dye tracer experiment was conducted in the catchment basin of the Partnach Spring (Zugspitzplatt) from August 2005 to July

2006. The main intention of the study was to establish the border of the catchment area of the Partnach by use of the fluorescence tracers Uranin and Eosin. Therefore Uranin and Eosin was injected into the karst system at two different points in the upper part of the catchment. Water samples were taken in high frequency at all springs and rivers belonging to the catchment. Even during the extreme rainfall event on 22 August sampling was continued at all important sampling points. Water levels were recorded regularly every 5 minutes by an electronic pressure probe near the Partnach Spring. Thus, tracer recovery rates could be calculated. No evidence was found of a significant bypass of water from the precipitation area of the Partnach basin into adjacent catchments. This finding is also valid for the area of the fault line (Gatterl fault) in the southeast of the investigation area. The fault line was estimated as a potential channel for groundwater flow into the adjoining Gaisalp valley in the south. High field velocities and high tracer recovery rates as well as small longitudinal dispersion coefficients of the fast component of flow indicate a well developed karst system in the underground of the Partnach catchment. Nevertheless, further tracer investigations are necessary to establish the catchment border in the eastern part of the Partnach basin, because of several fault lines causing complex hydrogeological settings.

Danksagung

Für die vielfältige Unterstützung möchten wir uns bei der Bayerischen Zugspitzbahn, dem Deutschen Alpenverein, den Bayerischen Staatsforsten und der Gemeinde Ehrwald herzlich bedanken. Ein ganz herzlicher Dank gilt den studentischen Teilnehmern des Geländepraktikums der LMU, die auch bei widrigsten Witterungsverhältnissen und zu allen Tageszeiten die Beprobung aufrecht hielten, sowie den Augsburgsburger Studenten, die bei der Tracereingabe tatkräftig geholfen haben. Ein besonderes Dankeschön auch an Charly Werle und sein Team von der Reintalanger Hütte für die herzliche Aufnahme und die Geduld mit uns!

Anschrift der Verfasser:

Dipl. Geogr. A. Rappl
Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung
Technische Universität München
Hans-Carl-von Carlowitz-Platz 2
85354 Freising

Prof. Dr. K.-F. Wetzel
Institut für Geographie
Universität Augsburg
Universitätsstr. 10, 86135 Augsburg
karl-friedrich.wetzel@geo.uni-augsburg.de

Dr. G. Büttner
M. Scholz
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Geologischer Dienst
Hans-Högn-Str. 12
95030 Hof/Saale

Literaturverzeichnis

- APEL, R., G. BÜTTNER, H. KRAFFT & I. KOSAK (2005): Tracing the Karst Water – Investigations in the Berchtesgaden National Park. – *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 48, Proceedings of the International Conference on Mountain Hydrology in Berchtesgaden (Sept. 2004), Braunschweig, S. 41–47
- BANDYOPADHYAY, J., J.C. RODDA, R. KATTELMANN, Z.W. KUNDZEWICZ & D. KRAEMER (1997): Highland waters – a resource of global significance. – In: Messerli, B. & J.D. Ives (Hrsg.): *Mountains of the World. A global priority.* – Parthenon Publishing Group, New York, London, p. 131–155
- BEHRENS, H. (1988): Quantitative Bestimmung von Uranin, Eosin und Pyranin in Gemischen mittels Fluoreszenzmessung bei definierten pH-Werten. – *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie*, Bd. 39, Graz, S. 117–129
- ENDRES, C. (1997): Hydrogeologie des Partnach-Ursprungs. – Dipl. Arbeit, Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der LMU München, 57 S., unveröff.
- FISCHER, K. (1995): Deutschlands Alpenanteil. – In: Liedtke, H. & J. Marcinek (Hrsg.): *Physische Geographie Deutschlands.* – Perthes, Gotha, S. 477–501
- FORD, D.C. & P.W. WILLIAMS (2008): Karst geomorphology and hydrology. – Wiley & Sons, Chichester, 562 S.
- GOLDSCHIEDER, N. (2002): Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems – Examples from the Northern Alps and the Swabian Alb. – Dissertation, Universität Karlsruhe, 236 S.
- GOLDSCHIEDER, N. & H. HÖTZEL (1999): Hydrogeological characteristics of folded alpine karst systems exemplified by the Gottesacker Plateau (German-Austrian Alps). – *Acta Carstologica* 28 (1): 87–103, Ljubljana
- HERRMANN, A. (2005): Preface. – *Landschaftsökologie und Umweltforschung.* – 48th Proceedings of the International Conference on Mountain Hydrology in Berchtesgaden (Sept. 2004)
- KÄSS, W. (2004): Hydrogeologische Markierungstechnik. – *Lehrbuch der Hydrogeologie* Bd. 9. – Bornträger, Stuttgart, 557 S.
- KFG (2009): Bayerische Gletscher. – Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften; <http://www.bayerische-gletscher.de/>, Stand 23.3.09
- LEIBUNDGUT, Ch., P. MALOSZEWSKI & C. KÜLLS (2009): Tracers in Hydrology. – Wiley-Blackwell, Chichester, 415 S.
- LEIBUNDGUT, Ch. (1995): Zur Hydrologie des Alpsteins. Hydrologische Untersuchungen im Karstgebiet des Alpsteins. – *Innerrhoder Schriften* Bd. 4, Appenzell, 125 S.
- LEIBUNDGUT, Ch. & I. VONDERSTRASS (1997): Dem Wasser der Churfirsten auf der Spur. – *Toggenburger Annalen*, S. 117–125

- MALOSZEWSKI, P., G. BÜTTNER, R. APEL, H. KRAFFT, M. SCHOLZ & B. WAGNER (2005): Quantitative evaluation of trace experiments in alpine karst and porous aquifers in the Berchtesgaden National Park. – *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 48, Proceedings of the International Conference on Mountain Hydrology in Berchtesgaden (Sept. 2004), Braunschweig, S. 11–18
- MATTHESS, G. & K. UBELL (2003): *Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt*. – Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1. – Bornträger, Stuttgart, 575 S.
- MILLER, H. (1962): *Zur Geologie des westlichen Wetterstein- und Mieminger Gebirges*. – Diss., LMU München, 118 S.
- MORCHE, D. (2006): Aktuelle hydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung (Wettersteingebirge), Oberbayern. – *WasserWirtschaft*, 96, S. 53–58
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1996): *Klimadaten von Deutschland – Zeitraum 1961 – 1990*. – Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 431 S.
- ORTH, J.P. (1984): Entwässerung synklinaler Karstkörper in den Bayerischen Alpen. – Akten 7. nat. Kongr. Höhlenforsch. Schwyz 1982 (Suppl. no.11 à „Stalactite“), Genève, S. 185–204
- PRÖSL, K.-H. (1985): Dissolved loads of Alpine Creeks and Rivers. – *Beiträge z. Hydrologie*, 5.1, Kirchzarten, S. 235–244
- RICHTER, W. & W. LILLICH (1975): *Abriß der Hydrogeologie*. – Schweizerbart, Stuttgart, 218 S.
- SCHUDEL, B., D. BIAGGI, T. DERVEY, R. KOZEL, I. MÜLLER, J.H. ROSS & U. SCHINDLER (2002): *Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie – Praxishilfe*. – Bericht des BWG, Serie Geologie Nr. 3, Bern, 75 S.
- VIVIROLI, D., H.H. DÜRR, B. MESSERLI, M. MEYBECK & R. WEINGARTNER (2007): Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. – *Water Resources Research*, Vol. 43, W07447, doi:10.1029/2006WR005653
- WETZEL, K.-F. (2004): On the hydrology of the Partnach area in the Wetterstein Mountains (Bavarian Alps) – *Erdkunde*, 58, S. 172–186
- WETZEL, K.-F. (2005): Discharge analysis of an alpine karst spring – the example of the Partnach Spring (Bavarian Alps). – *Landschaftsökologie und Umweltforschung*, 48, Proceedings of the International Conference on Mountain Hydrology in Berchtesgaden (Sept. 2004), S. 91–98
- WILHELM, F. (1997): *Hydrogeographie – Grundlagen der allgemeinen Hydrogeographie*. – Westermann, Braunschweig, 225 S.
- WROBEL, J.-P. (1980): Bericht über den Markierungsversuch auf dem Zugspitzplatt im Sommer 1980. – Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 6 p., 2 Beil.
- ZÖTL, J.G. (1974): *Karsthydrogeologie*. – Springer, Wien, 291 S.