

Bestimmung von Abflusswegen des Gletscherwassers in einer karstischen Umgebung

David Finger¹, Martina Kauzlaric¹, Andreas Hugentobler¹, Andrea Wirz¹, Daniela Fischer¹, Pierre-Yves Jeannin², Matthias Huss³, Hans Rudolf Wernli¹, Eric Weber², Emmanuel Rey¹, Bruno Schädler¹, Torsten Vennemann⁴ and Rolf Weingartner¹

¹ University of Berne, Institute of Geography, Bern, Switzerland

² Swiss Institute of Speleology and karst-Research, P.O. Box 818, CH-2301 La Chaux-de-Fonds, Switzerland

³ Department of Geosciences, University of Fribourg, Chemin du Musée 4, CH-1700 Fribourg

⁴ Institute of Mineralogy and Geochemistry, University of Lausanne, Bâtiment Anthropole 4170, CH-1015 Lausanne

Zusammenfassung

Der weltweite Gletscherrückgang wird in diesem Jahrhundert die Wasserverfügbarkeit in vielen Bergregionen drastisch verändern. In karstischen Bergregionen können solche Veränderungen markante Auswirkungen haben, da wichtige Wasserquellen versiegen könnten. Deshalb ist es wichtig die Herkunft des Abflusswassers zu untersuchen. Um die Herkunft des Abflusses zu bestimmen, haben wir rund um den Glacier de la Plaine Morte (eine karstische Bergregion im Berner Oberland, Schweiz) Isotopen in Wasserproben gemessen und einen Tracerversuch mit drei fluoreszierenden Tracern durchgeführt. Mit dem Tracerversuch konnten die Fliesswege des Schmelzwassers bestimmt werden und mit den Isotopenmessungen konnten Hinweise auf die Herkunft des Abflusswassers gewonnen werden. Die vorläufigen Resultate deuten darauf hin, dass die Karstquellen rund um den Glacier de la Plaine Morte im Frühjahr von der Schneeschmelze gespeist werden und im Herbst von der Gletscherschmelze. Der Tracerversuch zeigt, dass ein Grossteil des Schmelzwassers durch das glaziale Abflusssystem und über die Oberfläche Richtung Norden abfließt. Beachtliche Traceranteile wurden jedoch auch in den wichtigsten Karstquellen gefunden. Dem Tracerversuch ging eine Periode intensiver Schmelze und Ausbrüche von Gletscherrandseen voraus. Aufgrund dieser Faktoren war das glaziale Abflusssystem sehr gut ausgebildet, was die hohen Fliessgeschwindigkeiten erklärt. Es ist anzunehmen, dass früher im Jahr ein noch grösserer Anteil des Schmelzwassers ins Karstsystem einsickert. Da die Resultate zeigen, dass im Spätsommer einige Karstquellen vor allem von Gletscherwasser gespeist werden, kann angenommen werden, dass bei einem Verschwinden des Gletschers einige Karstquellen am Ende des Sommers austrocknen werden.

Einleitung

Im letzten Jahrhundert ist das Volumen von Gebirgsgletschern überall auf der Welt drastisch zurückgegangen. Der Gletscherrückzug wird das Wasserregime in vielen Bergregionen nachhaltig verändern und entsprechend die Wasserkraftproduktion verändern (Finger et al., 2012). Vorhersagen zu künftigen Wasserressourcen sind jedoch schwierig, insbesondere wenn die Schmelzwasserwege teilweise durch ein Karstsystem führen und daher die Abflussmengen nur schwer zu erfassen sind. Dabei kann die Klimaveränderung gerade in karstischen Gebieten bedeutende Auswirkungen für die Natur und die lokale Bevölkerung haben. Der Rückgang der Gletscher wegen der Klimaveränderung kann dazu führen, dass einige Wasserquellen, die aus dem Karstsystem gespeist werden, ganz austrocknen. In unwegsamen Gebirgsregionen kann dies gravierende Konsequenzen haben, da Ersatzwasser von weit her transportiert werden müsste.

Ein typisches Beispiel ist der Glacier de la Plaine Morte im Berner Oberland in der Schweiz. Das Schmelzwasser des Gletschers fließt sowohl nach Norden in den Kanton Bern, als auch in Süden in den Kanton Wallis ab. Das Wasser wird auf beiden Seiten für Wasserkraft, Tourismus, Trinkwasser und Landwirtschaft genutzt. Da ein beachtlicher Anteil des Schmelzwassers auch in das Karstsystem versickert, ist eine genaue Abschätzung des glazialen Abflussbeitrags schwierig. Vorläufige Prognosen zeigen, dass der Gletscher im Laufe des Jahrhunderts verschwinden wird (Huss, mündl. Mitteilung). Es ist zu vermuten, dass es dann zur Austrocknung einzelner Karstquellen kommt und somit die Existenzgrundlage betroffener Anwohner gefährdet würde.

Um die Abflusswege des Gletscherwassers zu definieren, haben wir eine Saison lang an allen wichtigen Quellen Abflussmessstationen installiert und Isotopensignale in Wasserproben gemessen. Zudem wurde im August fluoreszierender Tracer in das Schmelzwasser an der Gletscheroberfläche beigegeben, um die genauen Fließwege des Schmelzwassers zu identifizieren.

Untersuchungsgebiet

Der Glacier de la Plaine Morte liegt an der Wasserscheide zwischen Bern und Wallis auf ca. 2,750 m ü M. Der Gletscher bedeckt eine Fläche von ca. 8 km² und ist stellenweise über 200 Meter mächtig (Abbildung 1). Im Süden liegt der Winterskiort Crans-Montana, der primär vom Wintertourismus abhängt. Im Norden des Gletschers liegt das Simmental, wo Landwirtschaftsbetriebe vom Schmelzwasser des Gletschers abhängen.

Die Geologie unterhalb und um den Gletscher ist vom Karst geprägt in den Schmelz- und Niederschlagswasser versickern kann. Zahlreiche Karstquellen südlich und nördlich des Gletschers deuten darauf hin, dass beachtliche Anteile des Schmelzwassers zuerst durch das Karstsystem und dann in die Oberflächengewässer gelangen. Das Wasser aus den Karstquellen ist jedoch eine unverzichtbare Ressource für die verschiedenen Interessengruppen. Ohne Wasser aus den Karstquellen gibt es keine Wasserkraftproduktion, können Weiden und Rebberge nicht bewässert werden, gibt es kein Trinkwasser für die vielen Touristen und die künstliche Schneeproduktion müsste eingestellt werden.

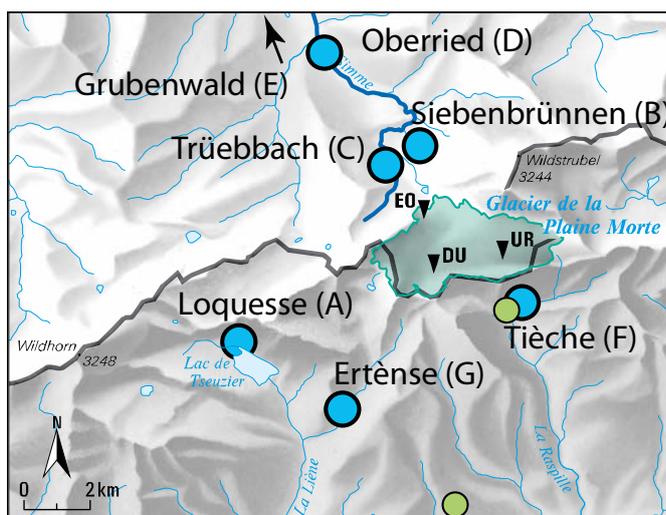


Abbildung 1: Übersicht des Testgebietes mit dem Glacier de la Plaine Morte, dem Simmental und der Crans-Montana Region. Blaue Punkte lokalisieren Probenentnahmestellen. Die Probenentnahmestelle bei Grubenwald (E) liegt etwa 7 km flussabwärts im Norden. Kleinere grüne Punkte stellen Niederschlagsammler dar.

Methode

Mit dem *Karst System Characterization* (KARSYS) Modell des Schweizerischen Instituts für Speläologie und Karstforschung (Vouillamoz et al., 2011) wurden die geologischen und hydrologischen Erkenntnisse des Testgebiets graphisch dargestellt. Dadurch konnte ein geeignetes Messnetz definiert werden und Hypothesen formuliert werden, wie Schmelzwasser vom Glacier de la Plaine Morte abfließt. Das Messnetz ist in vereinfachter Form in Abbildung 1 dargestellt.

Während der gesamten Schmelzphase (Juni - September) wurden zudem im Niederschlag, in der Schneeschmelze, im Gletscherwasser und in allen grösseren Karstquellen südlich des Gletschers die Isotopenzusammensetzungen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Werte) bestimmt. Die H- und O-Isotopie der beprobten Gewässer wurde an der Universität Lausanne mit einem Laser-Spektrometer System (Picarro L1102i) analysiert. Dabei werden die Messungen über drei unterschiedliche interne Standards kalibriert und über die internationale Skala von VSMOW und SLAP der IAEA normiert. Die Messgenauigkeit beträgt $\pm 0.07\text{‰}$ für O-Isotopie und $\pm 0.4\text{‰}$ für H-Isotopie.

Um die Abflusswege des Schmelzwassers zu identifizieren, haben wir einen Tracerversuch mit drei fluoreszierenden Tracern durchgeführt. Am 22. August 2011 wurden 30 kg Eosin, 60 Liter Duasyn und 12 kg Uranin an drei Stellen auf dem Gletscher dem Schmelzwasser beigemischt. In den folgenden Wochen wurden an über 20 wichtigen Karstquellen und Oberflächenabflüssen die Abflussmenge und Konzentration der Tracer bestimmt.

Die Tracerkonzentration wurde anhand eines Fluoreszenzspektrometers (auch Lumineszenzspektrometer oder Spektralfluorimeter genannt) im Labor bestimmt. Dabei werden die Proben mittels einer Lichtquelle angeregt. Wird ein Tracer mit Licht angeregt so emittiert er bei einer bestimmten Wellenlänge Fluoreszenzlicht (für Uranin: Anregung bei 490 nm / Fluoreszenz bei 515 nm, für Eosin 512 nm / 537 nm und für Duasyn 449 nm / 474 nm). Anhand der Intensität der Emission kann die Tracerkonzentration bestimmt werden.

In Tabelle 1 sind alle verfügbaren Beobachtungen und Messungen zusammengefasst.

Tabelle 1: Überblick der verfügbaren Daten

Parameter	Standort ⁽¹⁾	Sampling Periode	Einheit	Frequenz der Probenahme	Quelle
Tracerkonzentration (APEG)	A,B,C,D,E	22.8.11-31.8.11	mg m ⁻³	1,4,6,8,12,24h	GIUB
Tracerkonzentration (Fluorimeter)	A	22.8.11-3.10.11	ppb	5min	ISSK
Abfluss	D,E	1993-2012	m ³ s ⁻¹	5min	BAFU
Abfluss	C	Jan. 1952–Dez. 1995	m ³ s ⁻¹		BAFU
Pegelstand mittels Drucksonde	B	31.10.11-	cm	5min	GIUB
Abfluss	B	1973-1982	m ³ s ⁻¹	Tagesmittel	Ingenieursgemeinschaft Rawil Bern
Pegelstand mittels Drucksonde	C	2012	cm	5min	GIUB
Abfluss	A	2012	m ³ s ⁻¹	stündlich	GIUB
Niederschlag	F	2012		~monatlich	GIUB
Isotopenmessungen	A, G, und F	Juni bis Oktober	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ $\delta\text{D}\text{‰}$	~monatlich	GIUB

1) A= Loquesse, B=Siebenbrünnen, C=Trüebbach, D=Oberried bei Lenk, E=ARA Grubenwald, F= Tièche, G = Ertense

Ergebnisse

Tracerversuch

Die vorläufigen Resultate des Tracerversuchs zeigen, dass im Sommer ein Grossteil des Schmelzwassers sehr schnell nach Norden abfließt, ohne ins Karstsystem zu infiltrieren. Ein beträchtlicher Anteil des Tracers von der westlichsten Injektionsstelle konnte jedoch durch das Karstsystem ins Wallis, also auf die andere Seite der Wasserscheide gelangen. Innerhalb 48 Stunden sind die eingesetzten Tracer an den verschiedenen Messstellen beobachtet worden (Abbildung 2). In den folgenden drei Monaten konnten keine Tracerspuren in Wasserproben festgestellt werden. Dies zeigt, dass der gesamte Tracer innert zwei Tagen über die Oberfläche und durch das Karstsystem entwässert wurde.

In Tabelle 2 sind die vorläufigen Resultate des Tracer-Versuchs zusammengefasst.

Tabelle 2: Schätzungen der abgeflossenen Mengen Tracer

Messort	Abk.		Duasyne	Uranin	Eosin
Total eingesetzte Menge			60 L	12 kg	36kg
Standort (Gewässertyp)		Kanton	Menge gefunden am jeweiligen Standort		
Lenk (Oberflächenabfluss)	D	BE	Etwa ein Drittel	Zwei Drittel	Gesamte Menge
Grubenwald (Oberflächenabfluss)	E	BE	Etwa ein Viertel	Zwei Drittel	Gesamte Menge
Loquess (Karstquelle)	A	VS	Etwa ein Viertel	Nichts	Nichts
Siebenbrünnen (Karstquelle)	B	BE	Duasyne Spuren	Uranin Spuren	Eosin Spuren
Rezliberg (Karstquelle)		BE	Duasyne Spuren	Uranin Spuren	Eosin Spuren
Mittlere Fließgeschwindigkeiten [km h ⁻¹]					
Trübbach bei Siebenbrünnen (Oberflächenabfluss)	C	BE	< 4	< 4	-
Lenk (Oberflächenabfluss)	D	BE	< 6	< 6	< 6
Grubenwald (Oberflächenabfluss)	E	BE	< 7	< 7	< 7
Loquess (Karstquelle)	A	VS	< 0.5	-	-
Siebenbrünnen (Karstquelle)	B	BE	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Rezliberg (Karstquelle)		BE	-	< 0.5	< 0.5

Isotopenmessungen

Die Isotopenmessungen deuten darauf hin, dass ein beachtlicher Anteil des Schnee- und Gletscherwassers auch ins Karstsystem einsickert und darin sowohl nach Norden als auch nach Süden fließt. Die Isotopenzusammensetzung der Gewässer an den südlichen Standorten (A, G und F; siehe Abbildung 1) zeigen im Verlauf des Sommers eine deutliche Veränderung zu schwereren Isotopenzusammensetzungen (Abbildung 2, linke Figuren). Dies deutet darauf hin, dass im Juni der Abfluss eher von der Schneeschmelze geprägt ist, welches mittlere $\delta^{18}\text{O}$ Werte von -15 ‰ aufweist. Im August steigt das Signal leicht an und nähert sich den Werten, die Wildberger (1981) für Gletscherwasser gemessen hat. Die Messungen im September und Oktober weisen einen deutlichen Anstieg ^2H - und ^{18}O -Gehalts auf und nähern sich den gemessenen Werten des Sommerniederschlags. Messungen im gesammelten Niederschlag haben $\delta^{18}\text{O}$ Werte von zwischen -6 und -9.

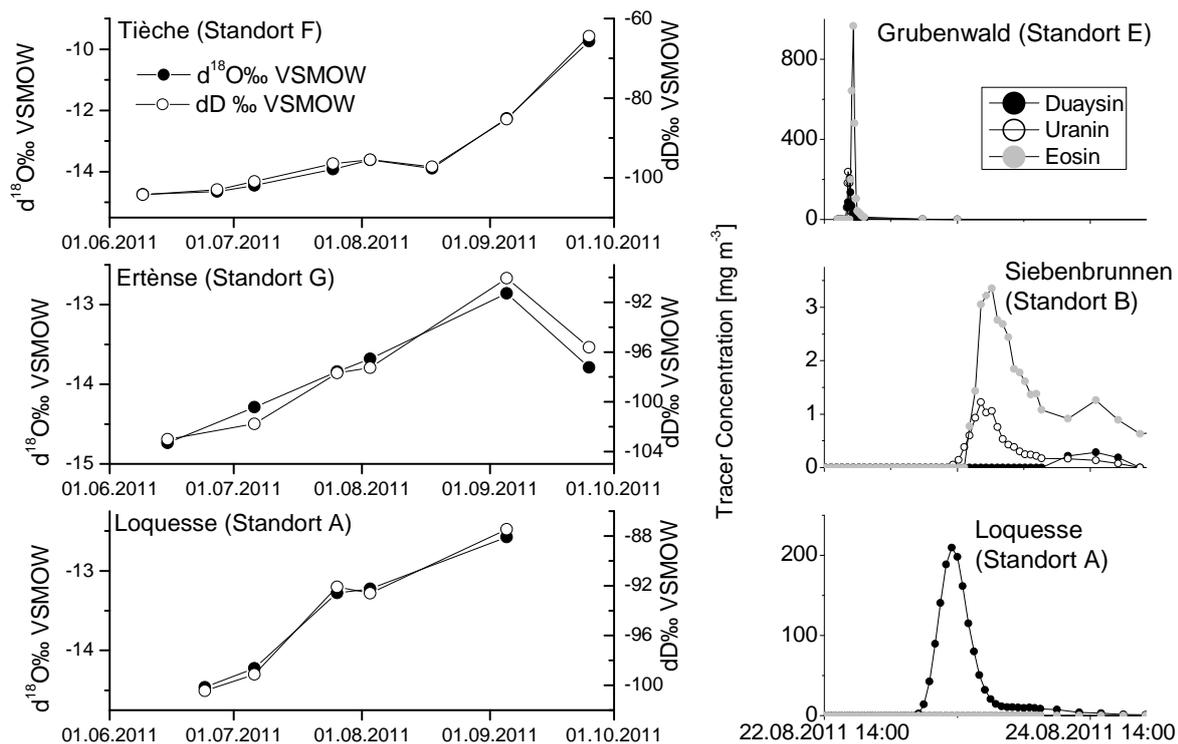


Abbildung 2: Resultate der Isotopenmessungen und der Tracerkonzentrationen an den verschiedenen Standorten um das Testgebiet. Figuren auf der linken Seite zeigen den saisonalen Verlauf des Isotopenmessungen und Figuren auf der rechten Seite zeigen den Verlauf der Tracerkonzentration kurz nach der Tracereinspeisung.

Diskussion

Die vorgestellten Resultate geben einen ersten Einblick in die Schmelzprozesse des Glaciers de la Plaine Morte und die Abflusswege im unterliegenden Karstsystem. Die periodischen Messungen der Isotopenzusammensetzung während der gesamten Schmelzphase des Jahres 2011 deuten darauf hin, dass in den meisten Karstquellen bis Ende Juni das Abflusswasser von der Schneeschmelze dominiert wird. Ab August steigen jedoch die $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ Werte in vielen Karstquellen an (Abbildung 2). Dies deutet daraufhin, dass das Schmelzwasser mehrheitlich aus Gletscherschmelze besteht, da dann das ganze Einzugsgebiet schneefrei ist. Im September und Oktober wurde eine deutliche Zunahme der ^2H - und ^{18}O -Gehalte in den wichtigsten Karstquellen beobachtet. Gleichzeitig einsetzende Niederschläge deuten darauf hin, dass in dieser Jahreszeit der Abfluss vermehrt aus lokalem Niederschlag besteht.

Die Erkenntnisse aus den Isotopenmessungen werden bestätigt durch die Resultate des Tracerversuchs Ende August 2011. Der Tracerversuch zeigt klar, dass viel Gletscherschmelze aus allen Regionen des Glaciers über die Oberfläche Richtung Simmental entwässert wird. Aber auch das Karstsystem reagiert äusserst schnell. Sehr hohe Konzentrationen von Duaysin wurden bei der Loquessequelle gefunden, was die Hypothese, dass viel Wasser durch den Karst zur Loquesse-Quelle fliesst, bestätigt. Es wurden jedoch nur geringe Mengen an Tracer in der Karstquelle bei Siebenbrunnen gefunden. Das deutet daraufhin, dass zu dieser Zeit das meiste Schmelzwasser durch das glaziale Abflusssystem und über die Oberfläche Richtung Simmental fliesst. Die im Jahr 2011 erstmals beobachteten Gletscherseen am Rand des Glacier de la Plaine Morte werden sich in naher Zukunft wahrscheinlich vergrössern. Gletscherseeausbrüche können das glaziale Abflusssystem sehr effizient erweitern und stellen ein

ernstzunehmendes Gefahrenpotential für das Simmental dar. Unsere Versuche zeigen, dass bei einem guten entwickelten Abflusssystem im Gletscher, wie im August 2011, Schmelzwasser schnell in Richtung Berner Oberland geleitet wird und nur zu einem geringeren Anteil ins Karstsystem einsickert. Langfristig kann jedoch angenommen werden, dass Quellen, die heute hauptsächlich mit Gletscherwasser gespeisen werden, aufgrund des Gletscherrückganges gegen Ende des Sommers austrocknen werden.

Schlussfolgerung und Ausblick

Aufgrund der vorläufigen Resultate können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden.

- 1) Der Tracerversuch hat gezeigt, dass nach einem warmen Sommer mit intensiver Gletscher und Schneeschmelze der grössere Teil des Schmelzwassers aus allen Bereichen des Gletschers dem Talweg entlang über die Oberfläche Richtung Norden ins Simmental abfließt. Infolge des Gletscherrückganges und des intensiven Schmelzwassereintrags könnte die Gefahr durch Gletscherseeausbrüche am Glacier de la Plaine Morte weiter ansteigen. Der Gletscherschwund in den Alpen wird kurz- bis mittelfristig zu einem Anstieg des Abflusses aus vergletscherten Einzugsgebieten führen (Huss et al., 2008).
- 2) Die ersten Isotopenmessungen deuten darauf hin, dass im Frühjahr der Abfluss in den Karstquellen von Schneeschmelze dominiert wird und in der zweiten Sommerhälfte von Gletscherschmelze. Langfristig muss jedoch befürchtet werden, dass Karstquellen, welche in der zweiten Sommerhälfte von Gletscherschmelze dominiert sind, im Herbst austrocknen werden.
- 3) Der Tracerversuch hat auch gezeigt, dass das Karstsystem äusserst schnell reagiert und dass das meiste Schnee- und Gletscherwasser, welches ins Karstsystem einsickert, zur Loquesse-Quelle geleitet wird.

Generell sind die Entwässerungsvorgänge komplexer als angenommen. Unser Vorgehen am Glacier de la Plaine Morte kann jedoch als Modellfall für ähnliche Systeme angesehen werden. Um die Entwässerungsvorgänge besser zu beschreiben und umfassend zu quantifizieren werden wir unsere Messungen im kommenden Jahr weiterführen.

Literatur

- Finger, D., G. Heinrich, A. Gobiet, and A. Bauder (2012), Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century, *Water Resour. Res.*, 48, W02521, doi:10.1029/2011WR010733.
- Huss, M., D. Farinotti, A. Bauder, & M. Funk (2008), Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate, *Hydrol. Processes*, 22(19), 3888–3902, doi:10.1002/hyp.7055.
- Vouillamoz J., Jeannin P-Y, Démary S., Weber E., Malard A. and U. Eichenberger (2011) KARSYS, un concept de caractérisation des systèmes karstiques pour une gestion durable des ressources en eau. 9th conference on limestone hydrogeology. Besançon, France
- Wildberger (1981) Beiträge zur Karsthydrologie des Rawil-Gebietes (helv. Kalkhochalpen zwischen Wildhorn und Wildstrubel), PhD, Universität Bern, Bern.