

# Tracerhydrologische Untersuchungen im Rofental (Öztaler Alpen/ Österreich)

von Jan Schmieder, Thomas Marke und  
Ulrich Strasser

## *Hintergrund*

Hochgebirge gelten weltweit als Wasserschlösser, deren Beitrag zum Wasserdargebot im Vergleich zu Vorländern überproportional groß ist. Dies spiegelt sich in der Nachfrage und Abhängigkeit eines Sechstels der globalen Bevölkerung wieder (Barnett et al., 2005). Höhere Niederschlagsmengen, bedingt durch einen orographischen Höheneffekt (der Niederschlag steigt mit der Höhe an), sowie die temporäre Speicherung der Niederschläge in der Schneedecke und im Gletschereis, welche dann erst zeitverzögert abflusswirksam werden, tragen dazu bei. In den europäischen Alpen wird das oberflächlich abfließende Wasser (in Form von kleineren Gerinnen und größeren Flüssen) vor allem für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen und für die Energieerzeugung mittels Wasserkraft genutzt (Schaepli et al., 2007; Beniston, 2012). Ein weiterer wichtiger Sektor im Bereich der Wassernutzung ist der Tourismus, z. B. im Bereich der technischen Schneeerzeugung (Hanzer et al. 2014, Rixen et al. 2011). Neben einem Überblick über die aktuell laufenden Forschungstätigkeiten im Rofental, einem Seitental des hinteren Ötztals, legen wir hier das Abflussverhalten und die Tracerreaktion der Rofenache, einem glazial geprägten Vorfluter, während eines hydrologischen Jahres dar.

## *Einführung*

Entgegen der langjährigen hydrologischen Forschungsgeschichte im Rofental, intensiviert seit der internationalen hydrologischen Dekade ab 1965 (initiiert durch die UNESCO), verbleiben weiterhin offene Fragen zur Abflussbildung und Herkunft des Wassers



*Jan Schmieder, MSc, beschäftigt sich in seiner Doktorarbeit anhand von Umweltracern mit der Herkunft und Zusammensetzung von Fließgewässern sowie der Plausibilisierung hydrologischer Modelle. Dr. Thomas Marke erforscht vor allem die Regionalisierung von Klimadaten sowie die Simulation hydroklimatologischer Prozesse in der Grenzschicht zwischen Landoberfläche und Atmosphäre. Prof. Dr. Ulrich Strasser modelliert seit Jahren schneehydrologische und hydroklimatologische Prozesse im Hochgebirge.*

im Hochgebirge. Die Tracerhydrologie gibt einen Einblick darin und hilft Anteile aus Gletscherschmelze, Grundwasser, Regen, und Schneeschmelze im Abfluss voneinander zu trennen. Ein natürlicher Tracer (dt. Markierungsstoff oder Indikator) ist in erster Linie ein qualitativer Informationsträger, welcher durch den Niederschlag in das System Einzugsgebiet eingetragen wird. Ein künstlicher Tracer kann auch durch den Menschen eingebracht werden (z. B. als Farbstoff für die Messung von Fließgeschwindigkeiten im Gewässer). In der Hydrologie werden Tracer seit den 1960er Jahren verwendet um Fließpfade, Verweilzeiten und Herkunftsräume des Wassers zu charakterisieren (Klaus und McDonnell, 2013).

Ein idealer Tracer verhält sich wie das Wassermolekül selbst und dessen Signatur verändert sich nicht durch ändernde Umweltbedingungen. Mischen sich Wässer mit verschiedenen Signaturen eines Tracers, so kann über die Massenerhaltung der jeweilige prozentuale Anteil der Herkunftswässer bestimmt werden. Dieser Vorteil wird in sogenannten Mischungsmodellen angewandt (vgl. Methodenteil).

Zur Bestimmung von Verweilzeiten und zur Identifizierung von Herkunftsräumen, woraus wiederum auf vorherrschende Abflussbildungsmechanismen geschlossen werden kann, eignen sich Abflusskomponententrennungsmethoden mittels natürlicher Tracer (auch Umwelttracer). Verwendung finden hierbei die Gehalte an stabilen Isotopen des Wassers (z. B. Sauerstoff-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ )) zur verweilzeitorientierten Abflusskomponententrennung und geochemische Tracer (z.B. elektrische Leitfähigkeit oder Metall-/Ionenkonzentrationen) zur herkunftsraumorientierten Abflusskomponententrennung. Verweilzeiten können beispielsweise über den Vergleich von saisonalen Inputtracerzyklen (Niederschlag) mit Outputtracerzyklen (Abfluss) bestimmt werden (siehe McGuire und McDonnell, 2006).

Ausgangslage für die Sauerstoff-18-Signatur ist die Zusammensetzung des Niederschlags beim Eintreffen in das System Einzugsgebiet. Die ursprüngliche Sauerstoff-18-Signatur ist dabei vom Sauerstoffisotopengehalt des Wasserdampfes, sowie der Temperatur bei der Entstehung des Niederschlags abhängig (Dansgaard, 1964). Im Einzugsgebiet ändert sich die Sauerstoff-18-Signatur durch sogenannte Fraktionierungsprozesse. Während Phasenübergängen tendieren die leichteren Sauerstoff-16-Atome (stärker als die schwereren Sauerstoff-18-Atome) dazu, in den energetisch leichteren Zustand zu übergehen. Dieser Prozess läuft auch umgekehrt bei einem Übergang in die energetisch höhere Phase ab (Gat, 2010). Diese beiden Prozesse, An- und Abreicherung von Sauerstoffisotopen, können zu unterschiedlichen Sauerstoff-18-Signaturen von Regen, Schnee, Gletscher, Quellen und Grundwasser führen. Die elektrische Leitfähigkeit steigt dabei mit der Anzahl an gelösten Ionen und ist von der Zeit, wie auch der Löslichkeit der Ionen im Gestein und Boden abhängig.

Für eine möglichst genaue Abschätzung der Volumina von abfließenden Komponenten wie Gletscherschmelze, Schneeschmelze, Regen und Grundwasser sind Erkenntnisse über die räumliche und zeitliche Variabilität der Signaturen dieser abflussbeitragenden Komponenten notwendig. In zwei vorangegangenen Studien konnte der Einfluss dieser Variabilität bereits aufgezeigt werden (Schmieder et al., 2016 und 2017, in Bearbeitung).

Untersuchungsgebiet

Abb. 1 zeigt das Einzugsgebiet der Rofenache im hinteren Ötztal und dessen Lage in den österreichischen Zentralalpen. Das Gebiet erstreckt sich von Vent (1900 m, Abflussmessstation) bis zum höchsten Gipfel Tirols, der Wildspitze, mit 3770 m (mittlere Einzugsgebietshöhe: 2950 m). Die Geologie ist durch kristallines Grundgestein charakterisiert, welches als Paragneis und Glimmerschiefer zu Tage tritt. Der Großteil der Fläche wird von Lockermaterial und anstehendem Grund-

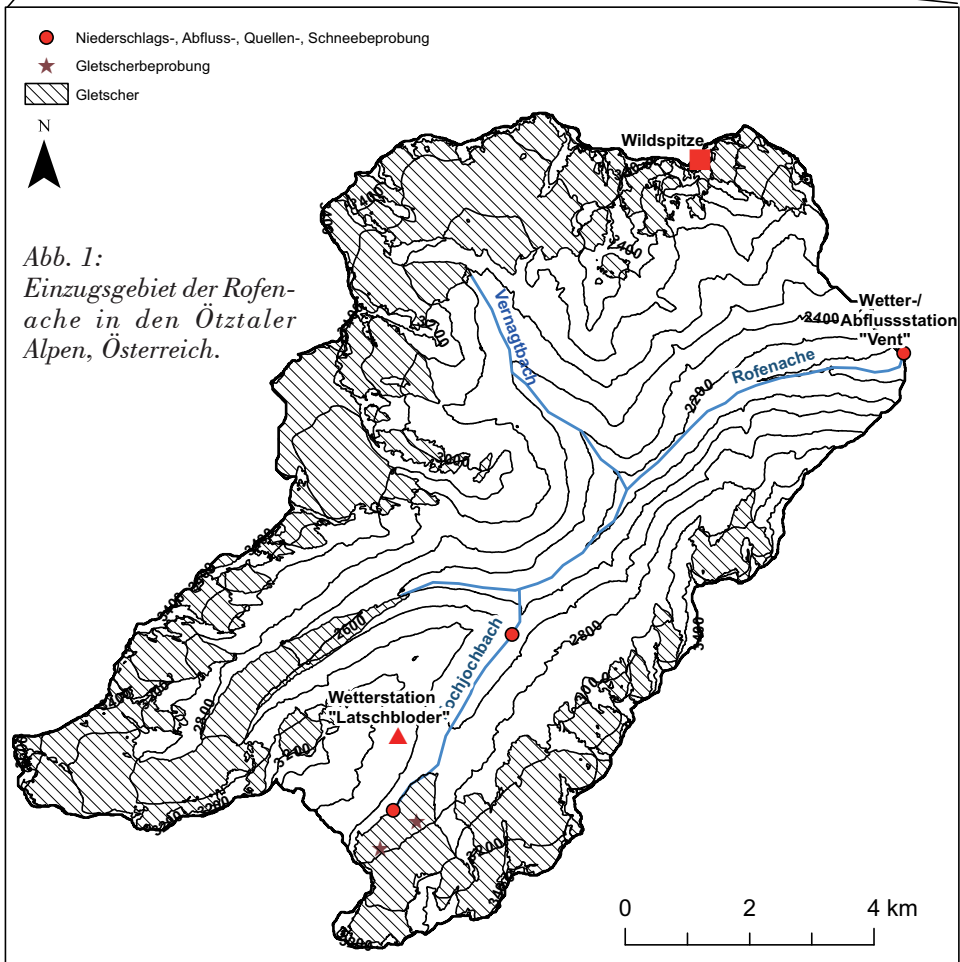
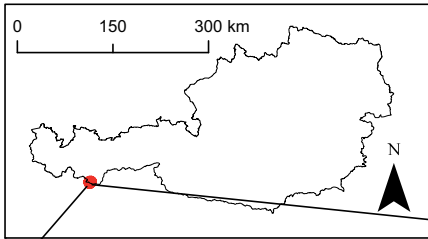


Abb. 1:  
Einzugsgebiet der Rofenache in den Ötztaler Alpen, Österreich.

gestein bedeckt (42 %). Wald spielt im Rofental eine vernachlässigbare Rolle (<1 % Flächenanteil) und erstreckt sich auf den Nordhängen in Nähe zum Gebietsauslass (bei Vent). Die alpinen Matten (ca. 20 % Flächenanteil) werden als Schafweideflächen extensiv genutzt. Etwa ein Drittel des 98 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiets der Rofenache wird von Gletschern bedeckt (Fischer et al., 2015). Die Rofenache entspringt am Gletscher der Hintereisferner in etwa 2500 m Höhe und durchfließt nach knapp 10 km die Abflussmessstation des Hydrographischen Dienstes Tirol in Vent. Auf ihrem Weg wird sie durch zwei größere Gerinne erster Ordnung (Hochjochbach und Vernagtbach), sowie weitere kleine Gerinne gespeist. Der mittlere jährliche Abflussverhalten der Rofenache wird dem glazialen Regime zugeordnet, mit überproportional großen (bis zu Faktor 25) Durchflüssen sowie Schwankungen in den Sommermonaten, und sehr geringen Schwankungen und Abflussvolumina während des Winters (Dezember bis März). Der langjährige mittlere Abfluss beträgt 4,5 m<sup>3</sup>/s (Zeitraum: 1971–2009). Die langjährige Jahresmitteltemperatur beträgt 2 °C und die langjährige Jahresniederschlagssumme 800 mm (in Vent für den Zeitraum 1982–2003). Durch den naturnahen Zustand dieses Kopfeinzugsgebiets (keine Wasserfassung für Kraftwerksbetrieb, keine Stauanlage) eignet sich die Rofenache besonders für detaillierte Prozessforschung.

### *Methoden*

Die in dieser Studie analysierten meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Niederschlag) stammen aus der Aufzeichnung der automatischen Wetterstation „Latschbloder“ (2920 m, siehe Abb. 1, Strasser et al., 2017). Die Abflussdaten vom Pegel in Vent wurden vom hydrographischen Dienst Tirol bezogen. Das Sammeln der Wasserproben fand ausschließlich im Rofental und mit Hilfe von studentischen Mitarbeitern statt. Die Standorte für die Probenahme sind in Abb. 1 ersichtlich. Die elektrische Leitfähigkeit (in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) des Wassers wird im Gelände mit einem tragbaren Taschengert ermittelt und ist ein Summenparameterindex für die Masse an gelösten Stoffen im Wasser. Da die elektrische Leitfähigkeit temperaturabhängig ist, wird sie geräteintern temperaturkompensiert. Für tracerhydrologische Fragestellungen werden Wasserproben vom Abfluss, von flachgründigen Quellen, Regen, Schnee und vom Gletscher genommen. Diese werden im Labor des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (Atmosphärische Umweltforschung) in Garmisch-Partenkirchen, einer Außenstelle des Karlsruher Instituts für Technologie, analysiert. Die Laborergebnisse beinhalten die Sauerstoff-18 Isotopensignaturen (in ‰) und die Laborgenauigkeit.

Die auf Tracern basierte Abflusskomponententrennung wurde erstmals von Pinder und Jones (1969) angewandt und beruht auf dem physikalischen Massenerhaltungsgesetz. Bei Mischung mehrerer Stoffe (Wasser mit unterschiedlichen Tracersignaturen) kann daher direkt auf die jeweiligen prozentualen Anteile geschlossen werden. Dadurch konnte in vergangener Zeit ein Durchbruch (Klaus und McDonnell, 2013) in der hydrologischen Forschung erreicht werden, indem nachgewiesen wurde, dass in humid

gemäßigten Einzugsgebieten der Großteil des Abflusses aus Wasser besteht, das schon vor dem Regenereignis im System gespeichert war. Dies ist in saisonal schneebedeckten und vergletscherten Regionen jedoch seltener zu beobachten, und viele Forschungsfragen dazu sind noch offen. Vor allem die erschwerte Zugänglichkeit der Gebiete im Hochgebirge verhindert hier ein rasches Vorankommen der Forschung. Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Abflusskomponententrennung sind signifikante Unterschiede in den Tracersignaturen der abflussbeitragenden Komponenten. Weitere Annahmen für die Anwendung dieser Methode sind in Klaus und McDonnell (2013) beschreiben. Die Unsicherheit dieser Methode kann mit dem Ansatz von Genereux (1998) abgeschätzt werden, welche auf der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung beruht. Die Unsicherheit wird dabei von der Laborgenauigkeit, der raumzeitlichen Variabilität, sowie dem Unterschied in der Tracerzusammensetzung der abflussbeitragenden Komponenten gesteuert.

*Erkenntnisse*

Abb. 2 zeigt Boxplots von winterlichen Basisabfluss-, Regen-, Schnee-, Gletscher-, Quell- und Abflussproben aus dem Einzugsgebiet der Rofenache für die beiden Tracer Sauerstoff-18 (Abb. 2 a) und elektrische Leitfähigkeit (Abb. 2 b) im Zeitraum Mai 2015 bis September 2016 (n=327). Deutlich erkennbar sind sowohl große Spannweiten in der Sauerstoff-18-Signatur von Gletscher-, Regen- und Schneeeproben sowie dem Abfluss der Rofenache, als auch in der elektrischen Leitfähigkeit der Quellproben. Markante Unterschiede in der Sauerstoff-18-Signatur zwischen Gletscher-, Schnee- und Regenproben

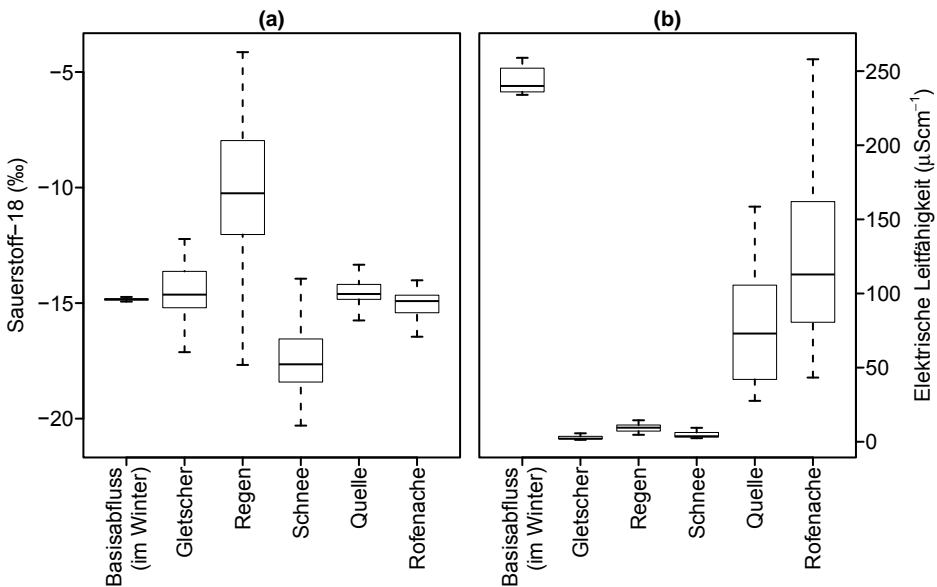


Abb. 2: Sauerstoff-18-Signatur (a) und elektrische Leitfähigkeit (b) von Wasserproben verschiedener Herkunftsräume im Rofental.

sind die Voraussetzung für das tracerbasierten Mischungsmodell (vgl. Methodenteil). Da sich jedoch der winterliche Basisabfluss nicht signifikant von den Gletscherproben unterscheidet, ist hier ein weiterer Tracer notwendig. Die elektrische Leitfähigkeit bietet als herkunftsräumorientierter Tracer die Lösung dazu, da sich die Werte des Basisabflusses signifikant von denen der Regen, Schnee- und Gletscherproben unterscheiden (Abb. 2b).

Beispielhaft soll anhand von Abb. 3 gezeigt werden wie sich der Abfluss und die Tracersignatur der Rofenache während des hydrologischen Jahres 2016 (Okt. 2015 bis Sep. 2016) verhalten. Der mittlere Durchfluss während dieser Periode beträgt  $4,05 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Abb. 3a lassen sich abnehmende Abflüsse ab Oktober erkennen, von  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  bis zu einem stabilen Wert von etwa  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  während der Wintermonate (Dez. bis Mär.). Anfang April steigt der Abfluss erstmals an (Maximalwerte bis  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Im Verlauf des Frühlings (Mai bis Mitte Juni) steigt der Abfluss weiter an und erreicht eine Abflussspitze von ca.  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (Mitte/Ende Juni). Im weiteren Verlauf des Sommers ist der Abfluss durch zwei Spitzenwerte (Starkregenereignisse mit ca.  $50 \text{ mm}/\text{d}$ ) und die höchsten Abflüsse während des hydrologischen Jahres 2016 (im Juli und August), sowie dem anschließendem Rückgang zum Herbst (Sep. und Okt.) hin, gekennzeichnet.

Mithilfe des saisonalen Verlaufs der Tracersignaturen im Abfluss der Rofenache kann noch ein qualitativer Mehrwert zur Durchflussmenge generiert werden: die elektrische Leitfähigkeit und Sauerstoff-18-Signatur weisen einen markanten Jahresgang während der Periode Oktober 2015 bis September 2016 auf (Mittelwert:  $153 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $-15,1 \text{ ‰}$ )

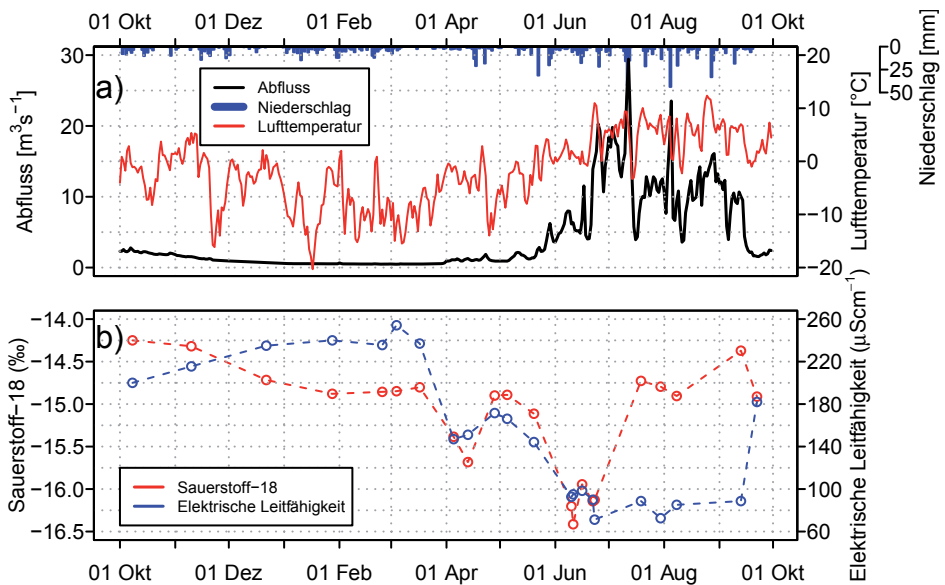


Abb. 3: (a) Tagesmittel aus Abfluss (Vent) und Lufttemperatur (Latschbloder), sowie Tagessummen des Niederschlags (Latschbloder); (b) Tracersignatur der Rofenache während des hydrologischen Jahres (Okt. 2015 bis Sep. 2016).

(Abb. 3 b). Von Oktober bis Ende März steigt die elektrische Leitfähigkeit von 200 bis 260  $\mu\text{S}/\text{cm}$  an, begleitet von einem Abfall der Sauerstoff-18-Werte (-14,3 bis -14,8 ‰). Diese beiden Tracerreaktionen des Abflusses zusammen mit der Durchflussrate während der Periode Oktober bis Ende März (vgl. Abb. 3 a) deuten auf zweierlei hin. Zum einen kann dadurch auf ein nachlassenden Einfluss des Verdünnungseffekts von Gletscherschmelzwasser mit sehr geringen Leitfähigkeitswerten (vgl. Abb. 2 b) geschlossen werden. Zum anderen kann der nachlassende Einfluss von isotopisch schwerem Regen beschrieben werden, da dieser nach und nach in Form von festem Niederschlag in der Schneedecke zwischengespeichert wird und nicht mehr abflusswirksam ist. Der Abfluss während dieser Periode wird sukzessive aus Zuflüssen des Grundwasserspeichers gespeist, welcher von Regen, Schneeschmelze und Gletscherschmelze neugebildet wird. Der erste markante Tiefpunkt der beiden Tracer (140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , -15,5 ‰) wird Anfang April erreicht und zeigt den ersten Schneeschmelzimpuls im System an, da isotopisch sehr viel leichteres Schneeschmelzwasser (vgl. Abb. 2 a) im Gerinneabfluss die Isotopensignatur senkt. Dies steht auch im Zusammenhang mit ansteigen Durchflussraten. Für diesen Systemzustand konnte in einer ereignisbasierten Studie (Schmieder et al., 2016) ein Schneeschmelzanteil von 35% im Abfluss abgeschätzt werden (Abb. 4 a). Der zweite Tiefpunkt von Sauerstoff-18 (-16,5 ‰) Mitte Juni ist ein Indikator für die Hauptschneeschmelze, bei der ein Großteil des Abflusses aus Schneeschmelzwasser zusammengesetzt ist. Hierbei können in der Rofenache maximale Anteile von knapp 80% erreicht werden (Abb. 4 b, Schmieder et al., 2016).

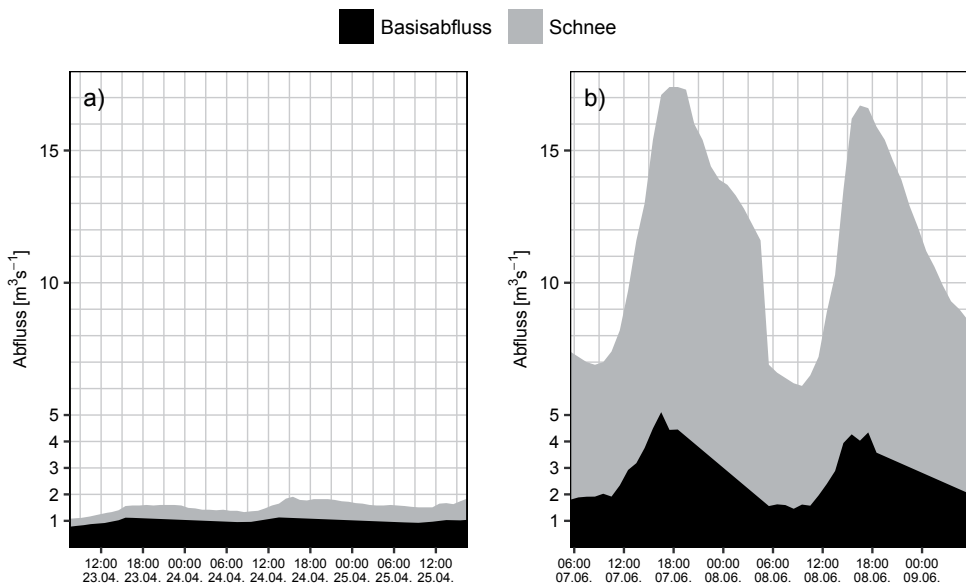


Abb. 4: Ablussanteile der Rofenache während eines frühen Schneeschmelzereignisses (a) und eines Ereignisses in der Hauptschneeschmelzperiode (b).



Im Verlauf des Sommers (Ende Juni bis Ende August) sinken die elektrischen Leitfähigkeitswerte leicht weiter und erreichen den jährlichen Tiefpunkt, während die Sauerstoff-18-Signatur wieder ansteigt. Dieses entgegengesetzte Verhalten beider Tracer ist ein Indikator für den immer größer werdenden Anteil von Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss, da dieses äußerst geringe Leitfähigkeitswerte, aber höhere Sauerstoff-18-Werte als das Schneeschmelzwasser aufweist (vgl. Abb. 2). Hier konnten maximale Gletscherschmelzwasseranteile im Abfluss von bis zu etwa 75 % in einem Teileinzugsgebiet des Rofentals (Hochjochbach, 17 km<sup>2</sup>, 34 % Vergletscherung) aufgezeigt werden (Abb. 5, Schmieder et al., 2017, in Bearbeitung).

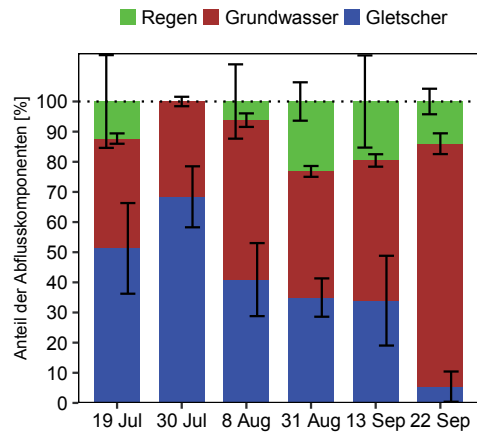


Abb. 5: Abflussanteile des Hochjochbaches während sechs Tagen in der Ablationsperiode des Hochjochferners. Die Fehlerbalken zeigen die Unsicherheit an (mit 95 % Konfidenz).

Als weiteren Grund für den Anstieg der Isotopensignatur im Abfluss kann auch der flüssige Niederschlag, welcher relativ hohe Sauerstoff-18-Werte aufweist, herangezogen werden. Da dieser nun nicht mehr in der Schneedecke zwischengespeichert wird und deutlich schneller abflusswirksam wird, kann er dadurch auch die Isotopensignatur des Abflusses beeinflussen. Bis zu 24 % Anteil an Regen im Abfluss wurden während der Ablationsperiode 2016 für das Einzugsgebiet des Hochjochbaches abgeschätzt, wobei besonders die Menge an 2-Tages-Vorniederschlag mit den Regenanteilen im Abfluss korreliert (Schmieder et al., 2017, in Bearbeitung). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die beschriebenen Untersuchungen vorwiegend an regenfreien Tagen durchgeführt wurden. Für Regenereignisse werden durchaus höhere Abflussanteile erwartet. Im Laufe des Septembers steigen die elektrischen Leitfähigkeitswerte wieder an und nähern sich den Hintergrundwerten des Winters an.

Ein perzeptives Modell („perceptual model“ nach Beven, 2012) ist eine schematische Abbildung wie ein Einzugsgebiet funktioniert und auf unterschiedliche Einflüsse (z. B. Schnee-/Gletscherschmelze) reagiert. Es beruht auf der Wahrnehmung des Forschers, seiner Erfahrung, welche Literatur er gelesen und welche Daten er analysiert hat. Das perzeptive Modell ist der erste Schritt im Modellierworkflow und zeigt die hydrologischen Prozesse, wobei diese nicht mathematisch beschrieben werden (Beven, 2012). In der Literatur sind einige solcher Modelle beschrieben, nicht jedoch für hochalpine Einzugsgebiete auf Grundlage unterschiedlicher Tracer. Penna et al. (2017) entwickelten ein perzeptives Modell der Abflussdynamik und Tracerreaktion anhand von Tracerdaten im 4 % vergletscherten Einzugsgebiet des Saldurbaches,



welches südlich des Alpenhauptkammes an das Rofental angrenzt. Dieses Modell konnte für die Rofenache adaptiert werden und ist in Abb. 6 dargestellt. Da sich die beiden Gebiete im Vergletscherungsgrad markant unterscheiden, wurde das Modell von Penna et al. (2017) für stark vergletscherte Gebiete weiterentwickelt. Ein Unterschied besteht darin, dass die Rofenache ein glaziales Regime aufweist (Abflussmaximum im August), während der Saldurbach ein nivo-glaziales Regime mit Abflussmaximum im Juni aufweist. Daher unterschieden sich die zwei Gebiete insofern, dass die Gletscherschmelze das Maximum des Jahresabflusses der Rofenache verursacht, wohingegen die Schneeschmelze das jährliche Maximum im Saldurbach verursacht. Dies zeigt sich auch an der Tracerreaktion des Vorfluters. So geht beispielsweise der Tiefpunkt der Leitfähigkeitswerte in der Rofenache mit maximalen Gletscherschmelzanteilen einher, während der jährliche Tiefpunkt der Leitfähigkeitswerte des Saldurbaches durch die höchsten Schneeschmelzanteile im Verlaufe des hydrologischen Jahres bedingt ist.

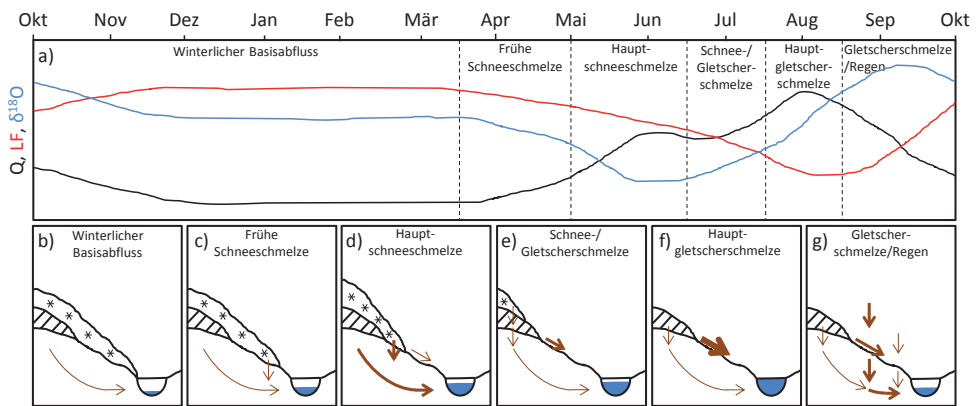


Abb. 6: *Perzeptives Modell der Abflussbildung und Tracerreaktion eines vergletscherten Einzugsgebiets. Die Pfeildicke zeigt die Magnitude des hydrologischen Prozesses an. Q: Abfluss, LF: elektrische Leitfähigkeit,  $\delta^{18}\text{O}$ : Sauerstoff-18.*  
(nach Schmieler et al., 2017, in Bearbeitung)

Während des Winters drainiert Bodenwasser und Grundwasser in den Vorfluter (Abb. 6 b). Das Einzugsgebiet wird durch Zwischenabfluss entwässert. Die hohen Leitfähigkeitswerte deuten darauf und auf lange Verweilzeiten hin. Zur Zeit der frühen Schneeschmelze (Abb. 6 c) infiltriert vorfluternahes Schneeschmelzwasser in den unteren Bereichen des Einzugsgebiets, und erhöht die Bodenfeuchte und geringfügig auch den Abfluss. Die Hauptschneesmelze ist durch ein markantes zurückweichen der Schneegrenze und hohe Schneeschmelzraten gekennzeichnet (Abb. 6 d). Die Infiltrationsraten sind maximal oder werden überschritten, was weitflächig zu schnellem Oberflächenabfluss führt. Der Zwischenabfluss steigt an und speist den Vorfluter. Vorfluternaher Feuchtplatten deuten den hohen Grundwasserstand an, welche zu weiter erhöhtem Zwischenabfluss führt („transmissivity feedback“). Abb. 6 e zeigt das schneefrei werden der Gletscher. Die Kombination aus Schnee- und Gletscherschmelze trägt zum

Abfluss bei. Durch die schneefreie Zunge wird der Gletscherschmelzabfluss aktiviert. Dies äußert sich in höheren oberirdischen Abflussraten im Gerinne. Zur Zeit der Hauptgletscherschmelze dominiert der schnelle Abfluss (im Gerinne oberirisch, Abb. 6f). Das Entwässerungssystem des Gletschers ist deutlich ausgeprägt und bedingt einen schnellen Durchfluss des oberflächlich generierten Schmelzwassers. Diese Periode ist auch durch die episodische Einwirkung von Niederschlagsereignissen geprägt. Da diese aber nur kurz dominieren, ist dies im Modell vernachlässigt worden. Bei nachlassendem Gletscherausfluss und weitgehend fehlender saisonaler Schneedecke dominiert der flüssige Niederschlag den Abfluss in der letzten Periode des hydrologischen Jahres (Abb. 6g).

### *Ausblick*

Nach den bisher abgeschlossenen und ereignisorientierten Detailstudien zum Abflussverhalten während der Schnee-, als auch der Gletscherschmelze ist nun geplant, den Fokus auf Regenerenisse und deren komplexes Zusammenspiel mit Schmelzprozessen im Rofental näher zu beleuchten. Dies, wie auch die exaktere Beschreibung von Grundwasserneubildungs- und Grundwasserabflussprozessen im Hochgebirge stellt ein spannendes Forschungsfeld mit internationaler Wahrnehmung dar. In einem weiteren Schritt werden die Abflusskomponenten auf saisonaler Skala mit dem tracerbasierten Mischungsmodell abgeschätzt. Nach Beendigung der Geländearbeit im Herbst 2017 soll dann eine dreijährige Zeitreihe von Abflussanteilen auf zumindest monatlicher Basis verfügbar sein. Diese wird dann in einem letzten Schritt mit simulierten Abflussanteilen aus dem hydroklimatologischen Modell AMUNDSEN verglichen. Der dreijährige Datensatz soll dann auch verwendet werden, um das perzeptive Modell zu verfeinern. Spannend wäre hier sicher auch, dieses Modell in anderen stark vergletscherten Gebieten zu testen.

### *Zusammenfassung*

In dieser Studie konnte der Mehrwert zweier Tracer mit unterschiedlichem Informationsgehalt in synoptischer Analyse mit meteorologischen und hydrometrischen Daten (Lufttemperatur, Niederschlag, Durchfluss) für die Hydrologie vergletschelter Einzugsgebiete skizziert werden. Innerhalb dieser Studie wurde die zentrale Bedeutung der Schnee- und Gletscherschmelze für das Abflussgeschehen im Hochgebirge quantitativ bestätigt, aber auch die bislang weniger erforschte Dynamik mit Grundwasser und Regen aufgezeigt. Der Jahresgang der Tracerreaktion im Abfluss der Rofenache ist typisch für vergletscherte Einzugsgebiete und unterliegt deutlichen Schwankungen, mit einem prägnanten Minimum an Sauerstoff-18 im Juni, welches durch die Schneeschmelze (Anteil im Abfluss bis zu 80 %) bedingt ist, und einem Minimum der elektrischen Leitfähigkeit im August. Dies ist ein Indikator für den dominanten Gletscherschmelzanteil im Abfluss (bis zu 75 %). Während des Winters unterliegen beide untersuchten Tracer nur geringen Schwankungen. Diese vorläufigen Ergebnisse lassen sich für die Plausibilisierung entsprechender hydrologischer Modelle verwenden und dienen daher einem verbesserten Prozessverständnis der Hydrologie im Hochgebirge.

## *Danksagung*

Die vorliegende Studie ist Teil des durch die österreichische Akademie der Wissenschaften geförderten Forschungsprojektes HydroGeM<sup>3</sup>. Dieses Projekt wird in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner des Instituts für Geographie der Universität Bern durchgeführt, welche vergleichbare Studien im schweizerischen Einzugsgebiet der Lütschine durchführen. Besonderer Dank gilt unserem Laborpartner für die Analyse der stabilen Isotope des Wassers, dem Center of Stable Isotopes des Karlsruher Instituts für Technologie, sowie dem hydrographischen Dienst Tirol für die Bereitstellung der Daten von der Pegelstation in Vent. Ausgesprochen dankbar sind wir auch den studentischen Mitarbeitern, ohne die die Geländearbeit in diesem Umfang nicht durchführbar gewesen wäre.

## *Literatur*

- Barnett, T. P., Adam, J. C., and Lettenmaier, D. P.: Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438, 303–309, 2005.
- Beniston, M.: Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps, *Journal of Hydrology*, 412–413, 291–296, doi:<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046>, 2012.
- Beven, K. J.: *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, Wiley, 2012.
- Dansgaard, W.: Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 16, 436–468, doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x, 1964.
- Fischer, A., Seiser, B., Stocker Waldhuber, M., Mitterer, C., and Abermann, J.: Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria, *The Cryosphere*, 9, 753–766, doi:10.5194/tc-9-753-2015, 2015.
- Gat, J. R.: *Isotope Hydrology: A Study of the Water Cycle*, Imperial College Press, 2010.
- Hanzer, F., Marke, T., and Strasser, U.: Distributed, explicit modeling of technical snow production for a ski area in the Schladming region (Austrian Alps), *Cold Regions Science and Technology*, 108, 113–124, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.08.003>, 2014.
- Klaus, J. and McDonnell, J. J.: Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation, *Journal of Hydrology*, 505, 47–64, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.006, 2013.
- McGuire, K. J. and McDonnell, J. J.: A review and evaluation of catchment transit time modeling, *Journal of Hydrology*, 330, 543–563, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.04.020, 2006.
- Penna, D., Engel, M., Bertoldi, G., and Comiti, F.: Towards a tracer-based conceptualization of meltwater dynamics and streamflow response in a glacierized catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 23–41, doi:10.5194/hess-21-23-2017, 2017.
- Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Puetz, M. and Bebi, P.: Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mt. Res. Dev.* 31, 229–236, 2011.
- Schaeffli, B., Hingray, B., and Musy, A.: Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1191–1205, doi:10.5194/hess-11-1191-2007, 2007.
- Schmieder, J., Hanzer, F., Marke, T., Garvelmann, J., Warscher, M., Kunstmann, H., and Strasser, U.: The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 5015–5033, doi:10.5194/hess-20-5015-2016, 2016.
- Schmieder, J., Marke, T., Garvelmann, and Strasser, U.: Spatio-temporal tracer variability in winter baseflow and glacier melt and its influence on hydrograph separation (in Bearbeitung).
- Strasser, U., Marke, T., Braun, L., Escher-Vetter, H., Juen, I., Kuhn, M., Maussion, F., Mayer, C., Nicholson, L., Niederscheider, K., Sailer, R., Stötter, J., Weber, M., and Kaser, G.: The Rofental: a high Alpine research basin (1890 m – 3770 m a.s.l.) in the Ötztal Alps (Austria) with over 150 years of hydro-meteorological and glaciological observations, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 2017, 1–27, doi:10.5194/essd-2017-85, 2017.

