

Wasseralter und Schutz einer komplexen Karstquelle (Walchhof Quelle): Hydrogeologie, Isotopen- ($^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$, ^3H , ^{14}C , ^3He) und Gastracermessungen (FCKW-11,-12,-113, SF_6)

Water ages and protection of a complex karst spring (Walchhof spring): Hydrogeology, isotopes ($^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$, ^3H , ^{14}C , ^3He) and tracer gas analyses (CFC-11,-12,-113, SF_6)

T. ZWACK¹ & M. KRALIK²

¹ mjp Ziviltechniker GmbH, Bachwinkl 126, A-5760 Saalfelden am Steinernen Meer; t.zwack@mjp-zt.at

² Dept. f. Umweltgeowissenschaften, Universität Wien, Althanstr. 14, A-1090 Wien; martin.kralik@univie.ac.at

Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Studie ist für die gefasste Walchhof Hauptquelle, die Teil der Trinkwasserversorgung von Radstadt im Bundesland Salzburg ist, die Ausweisung eines angemessenen Schongebietes. Die Walchhof Quellen (ca. 500 l/s) sind regional bedeutende sulfathaltige alpine Karstquellen, die an der Deckengrenze des Radstädter- zum überlagernden Schladming-Seckau-Deckensystems im Bereich einer tektonischen Fensterstruktur austreten. Im Einzugsgebiet wurde am Fluss Taurach und seinen Zuflüssen systematisch die elektrische Leitfähigkeit untersucht, um hochmineralisierte Quellsutritte aus dem Rauhwacken führenden Radstädter Deckensystem nachzuweisen. Zusätzlich wurde die Geologie des unmittelbar über den Walchhof Quellen liegenden Nerggrabens samt den alluvialen Schwemmfächern kartiert und durch Fluoreszenztracerversuche ein geringer kurzfristiger Einfluss im Quellwasser nachgewiesen. Vereinzelt positive mikrobiologische Nachweise unterstreichen dieses zeitweise Auftreten von sehr jungen Wässern. Monatliche $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ Isotopenmessungen über das Jahr 2019/20 an der gefassten Walchhof Hauptquelle bzw. einer hochgelegenen Eichquelle sowie ein- bis zweimalige $^3\text{H}/^3\text{He}$ -, FCKW/ SF_6 und $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ -Messungen an der Hauptquelle bestätigen das hydrogeologische Untergrundmodell, wonach ein Großteil der erschroteten Wässer einem weiträumigen und vor allem hochgelegenen Einzugsgebiet (2000 ± 200 m) zuzuordnen ist, mit einer Mischung aus einem älteren 10-20 Jahren Anteil und einem sehr alten Anteil von bis zu mehreren 1000 Jahren. Abflussmessungen und $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Messungen zeigen, dass jedoch kurzfristige Starkregenereignisse oder Schneeschmelzen eine geringe Menge (< 10 %) an sehr jungem Wasser zumischen können. In Kombination mit Wasserbilanzierungen in den potentiellen Einzugsgebieten in Form von verkarsteten Karbonatvorkommen – denn diese bilden den Hauptwasserspender der Walchhof Quellen – konnte das hydrogeologische Einzugsgebiet schließlich eingegrenzt und somit das geplante Schongebiet deutlich verkleinert werden.

Abstract

Aim of the study was to delineate an appropriate wide-ranging drinking water protection zone for the tapped main Walchhof spring, which is part of the public water supply of the small city of Radstadt in the region of Salzburg, Austria. The immediate hydrographic catchment area of the spring (Nerggraben) was geological mapped, various electric conductivity measurements at the river Taurach and its tributaries were carried out to detect potential high mineralised karst water influx and fluorescence tracer tests were performed on the adjacent hydrographic catchment area above the

tapped main spring. The Walchhof springs discharge approximate 500 l/s in a complex alpine setting within a tectonic window structure built of the Radstadt nappe with permeable carbonate rocks overthrust by the Schladming-Seckau nappe with mostly non-permeable phyllite rocks. To identify the mean altitude of the catchment area and the Mean Residence Time (MRT) of the spring waters a combination of isotopes $^2\text{H}/^{18}\text{O}$, $^3\text{H}/^3\text{He}$, $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ and tracer gases (CFC, SF_6) was analysed. The results indicate a wide-ranging hydrogeological catchment area at a mean altitude of 2000 ± 200 m and a mixture of old (10-20 yrs.) and very old (several thousand years) waters. However, heavy rainfall and snow melt events can add (< 10 %) very young water (MRT: days-weeks) to the tapped main Walchhof spring most likely from the Nerggraben. The combination of these methods allows to reduce the wide-ranging drinking water protection zone mainly to the immediate hydrographic catchment area.

Schlüsselwörter: Karstquelle, Isotopenmessung, $^3\text{H}/^3\text{He}$, FCKW/ SF_6 , $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$, hydrogeologisches Einzugsgebiet

Keywords: Karst spring, isotope analyses, $^3\text{H}/^3\text{He}$, CFC/ SF_6 , $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$, hydrogeological catchment area

Einführung

Die Walchhof Karstquellen (ca. 910 m ü. A.) befinden sich rd. 4 km südlich der Gemeinde Radstadt (858 m ü. A.) im Taurachtal (Abb. 1). Dort treten auf dem Schwemmfächer des Nerggrabens, der die nach Osten abfallende Talflanke unterhalb des Vorderen Labenecks (1832 m ü. A.) entwässert, mehrere Einzelquellen bis rd. 35 m oberhalb des rezenten Talbodens zu Tage. Die Quellgruppe weist eine Gesamtschüttung von etwa 500 l/s auf, die gefasste Hauptquelle schüttet in etwa 120 l/s.

Zur Absicherung der Wasserversorgung der Gemeinde Radstadt wurde 2010 die Walchhof Hauptquelle gefasst und in das Versorgungsnetz eingebunden. Um den Schutz der neuen Fassungsanlage sicherzustellen, wurde bereits ein zweistufiges Schutzgebiet, unter anderem auf Basis von Tracerversuchen, im unmittelbaren Einzugsbereich des Wasserspenders ausgewiesen (Moser-Jaritz ZT-GmbH, 2012).

Zum weiteren Schutz der Walchhof Quelle, die auch eine überregionale Bedeutung als Notwasserversorgung hat, sollte schließlich ein Schongebietsvorschlag ausgearbeitet werden. Eine Abgrenzung des Schongebiets rein anhand des orographischen Einzugsgebietes war im gegenständlichen Fall nicht zielführend, da der erschrotete Karstwasserkörper auf Basis der vorliegenden Schüttungsmengen ein weiträumiges ober- und unterirdisches Einzugsgebiet aufweisen muss.

Es wurde daher zunächst versucht, eine Abgrenzung auch unter Berücksichtigung des geologisch und hydrologisch abgrenzbaren Karstwasserkörpers durchzuführen (Moser-Jaritz ZT-GmbH, 2016). Wegen des komplizierten tektonischen Baus des Untersuchungsraumes sowie mangels Markierungsversuchen auf regionaler Ebene, existieren, bezogen auf die Ausdehnung eines im Untergrund zusammenhängenden Karstwasserkörpers, erhebliche Unsicherheiten.

Mit Hilfe von Isotopen- und Gastracermessungen wurden daher das Alter der erschroteten Wässer sowie die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes ermittelt (Kralik, 2020), um das hydrogeologische Einzugsgebiet der Quellen besser eingrenzen zu können und die Notwendigkeit eines weiträumigeren Schongebietes abzuklären.

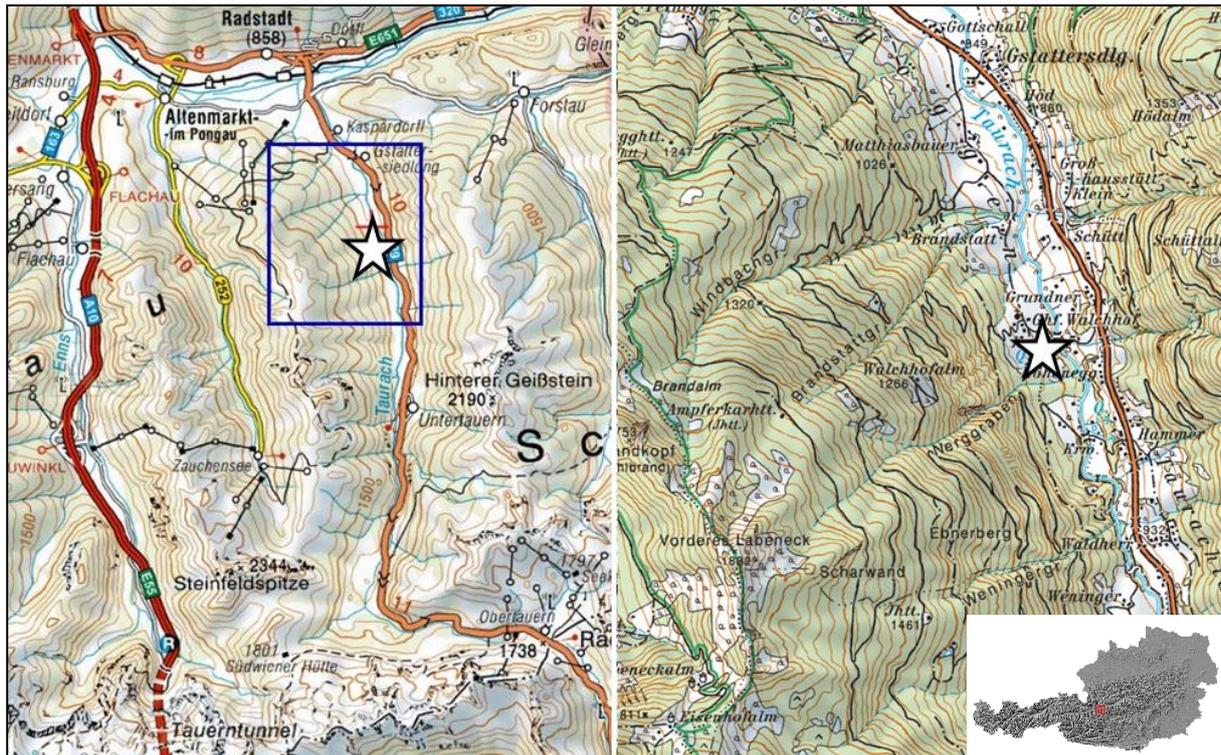


Abbildung 1: Geographischer Überblick mit den Walchhof Quellen (Stern) auf der Österreichischen Karte 1:50.000.

Geologie

Großtektonisch können im Einzugsgebiet der Walchhof Quellen zwei Deckensysteme unterschieden werden (Abb. 2). Das liegende (untere) Stockwerk bildet das unterostalpine Radstädter Deckensystem (RD), welches im Wesentlichen aus triassischen Karbonaten gebildet wird. Darüber liegt das oberostalpine Schladming-Seckau-Deckensystem (SSD), welches durch Quarzphyllite und untergeordnet Quarzite vertreten wird. Als Übergang von quarzitischen Gesteinen zu karbonatischen Gesteinen tritt häufig eine gelbbraune poly- und monomikte Rauhucke zu Tage. Rauhucken können jedoch auch innerhalb der Karbonathorizonte auftreten, wenn sie durch starke tektonische Prozesse entstanden sind (Rossner, 1979).

In der Tiefenlinie des Taurachtales treten die unterlagernden Karbonate in Form zweier tektonischer Fenster zu Tage, wobei große Areale des Festgesteins von quartären Sedimenten überdeckt werden. Das nördliche dieser beiden Fenster wird als Brandstattwaldfenster bezeichnet. An dessen Nord Rand treten die Walchhof Quellen zu Tage. Ein zweites Fenster von etwa derselben Größe liegt unmittelbar südlich und wird als Lackengutfenster bezeichnet. Im orographischen Einzugsgebiet der Walchhof Quellen bzw. in den unmittelbar angrenzenden Nachbartälern sind noch weitere Karbonatvorkommen des Radstädter Deckensystems bekannt, die räumlich und geomorphologisch voneinander abgegrenzt werden können (Abb. 2, Abb. 12).

Die gefasste Walchhof Hauptquelle liegt auf dem ausgedehnten Schwemmfächer am Ausgang des Nerggrabens, der aus grob-, untergeordnet gemischtkörnigen Wildbachablagerungen sowie Murstoßsedimenten aufgebaut wird. Die angrenzenden Wiesenflächen werden von

Grundmoränenablagerungen eingenommen, die vermutlich älteren quartären Ablagerungen und/oder dem anstehenden Festgestein auflagern (Abb. 3).

Das anstehende Festgestein in Form unterschiedlichster, teils intensiv verkarsteter Karbonatabfolgen und Rauhwacken des Radstädter Deckensystems tritt erst im Bereich der Schwemmfächerwurzel offen zutage. Ab dort hat der Nerggraben eine klammartige Schluchtstrecke in den Karbonaten geschaffen, die bis auf rd. 1260 m Seehöhe reicht. Oberhalb ist das Gerinne nur noch flach eingetieft und der Untergrund wird bis in die Gipfelregion des Vorderen Labenecks (1832 m ü. A.) im Wesentlichen von Quarzphylliten aufgebaut.

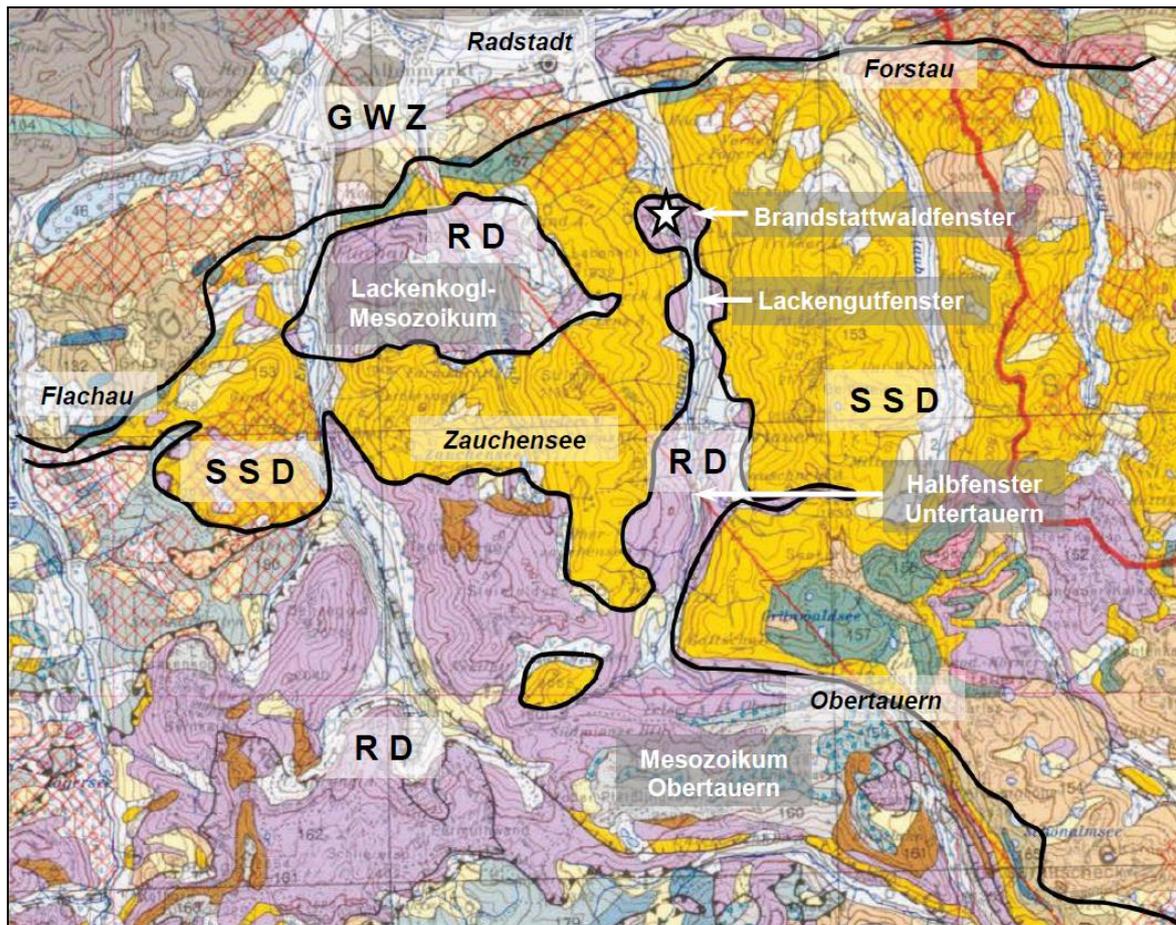


Abbildung 2: Geologischer Überblick mit den Walchhof Quellen (Stern) anhand eines Ausschnittes aus der Geologischen Karte von Salzburg 1:200.000 (Geologische Bundesanstalt, 2005). Legende: Großtektonische Einheiten - GWZ = Gauwackenzone, SSD = Schladming-Seckau Deckensystem, RD = Radstädter Deckensystem, Gesteinsformationen - gelb-orange: Alpin Verrucano und Lantschfeldquarzit, violett: Triassische Karbonate, grau: Hauptdolomit und Kössen-Formation. Weiße Beschriftung: Maßgebliche Karbonatvorkommen innerhalb des Radstädter Deckensystems.

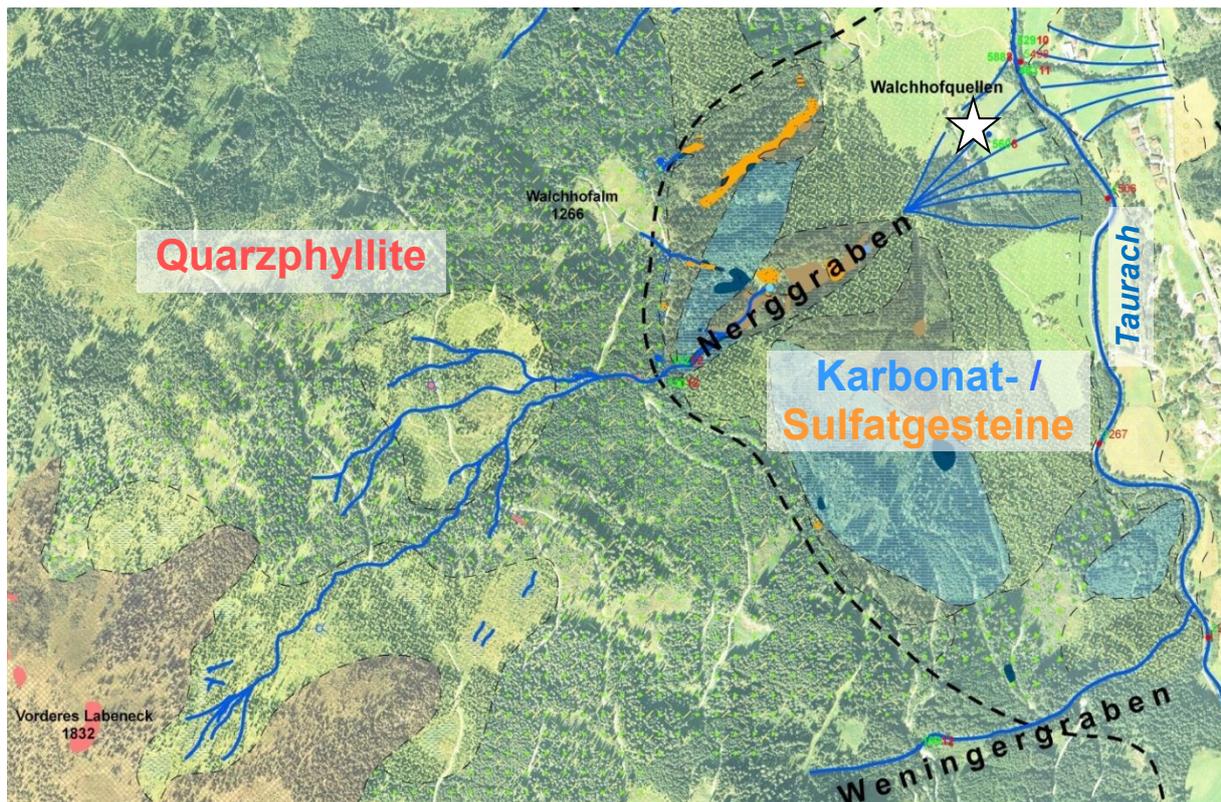


Abbildung 3: Geologische Karte des Nerggrabens, der das unmittelbare orographische Einzugsgebiet westlich der gefassten Walchhof Quellen (Stern) bildet, mit der tektonischen Grenze (schwarz strichliert) zwischen dem Radstädter und dem Schludming-Seckau Deckensystem.

Klima, Schüttung und Chemismus der gefassten Walchhof Hauptquelle

Um die Walchhof Quellen und deren Einzugsgebiet herrscht ein kühl gemäßigtes bis kaltes alpines Klima. Radstadt (890 m ü. A.) und Obertauern (1771 m ü. A.; Hydrografischer Dienst, 2019) weisen einen durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 1100-1200 mm auf. Der Winterniederschlag (Dezember-März) fällt vorwiegend als Schnee. Die Monatsmittel der Lufttemperaturen schwanken im Vergleichszeitraum (1992 bis 2013) zwischen -5 und 17 °C. In den höchstgelegenen Bereichen des Einzugsgebietes (1800-2300 m ü. A.) sind die durchschnittlichen Niederschläge entsprechend höher und die Temperaturen geringer.

Die Schüttung der gefassten Walchhof Hauptquelle steigt im aktuellen Beobachtungszeitraum von 2016 bis 2019 jeweils im März-April von 112-116 l/s um 5-10 % auf 122-127 l/s zwischen Mai bis September an (Abb. 4). Dieser Anstieg ist wahrscheinlich auf die Erhöhung des hydrostatischen Drucks im Reservoir und/oder auf den Zufluss jüngerer Wässer über den Nerggraben bzw. dessen Schwemmfächer im Zuge der Schneeschmelze zu erklären. Hinweise für einen Direktzufluss liefern vereinzelte positive bakteriologische Befunde während der Schneeschmelze im Zeitraum zwischen März und Mai in den Jahren 2010-2012 nach der Fassung sowie die Ergebnisse zweier Tracerversuche mit Eosin und Uranin zur Ermittlung des Einflusses von versickernden Oberflächenwässern des Nerggrabens. Bei der Einspeisung im Bereich einer Versickerungsstelle in den Karbonaten während einer Niedrigwasserphase wurde auch nach 4 Wochen kein Durchgang in der Hauptquelle festgestellt, wohingegen bereits 5 Stunden nach der Einspeisung innerhalb der Lockergesteine auf dem

Schwemmfächer ein sehr stark vermindertes Signal gemessen wurde, das auf starke Verdünnung hinweist (Moser-Jaritz ZT-GmbH, 2012).

Interessant ist eine geringfügige Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von 571 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$, die gleichzeitig mit der Schüttungserhöhung im November 2019 auftrat (Tab. 1, Tab. 2, Abb. 4), während die Wassertemperatur mit 6,85-6,88 $^{\circ}\text{C}$ nahezu konstant bleibt. Die hohe Mineralisation ist auf Sulfat (193 mg/l) und Hydrogencarbonat (154 mg/l) zurückzuführen sowie auf die Kationen Calcium (84 mg/l) und Magnesium (28 mg/l). Der pH-Wert von 7,41 und gelöster Sauerstoff von 5,51 mg/l wurden nur einmal gemessen und entsprechen einem Grundwasser mit längerer Verweilzeit. Diese Ergebnisse entsprechen den sehr konstanten Werten, die im Median seit 1995 mit 6,90 $^{\circ}\text{C}$, 599 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 7,8 und 6,33 mg/l bis jetzt in engen Grenzen gleichgeblieben sind (Nr. KK52207182; H₂O Fachdatenbank, 2019).

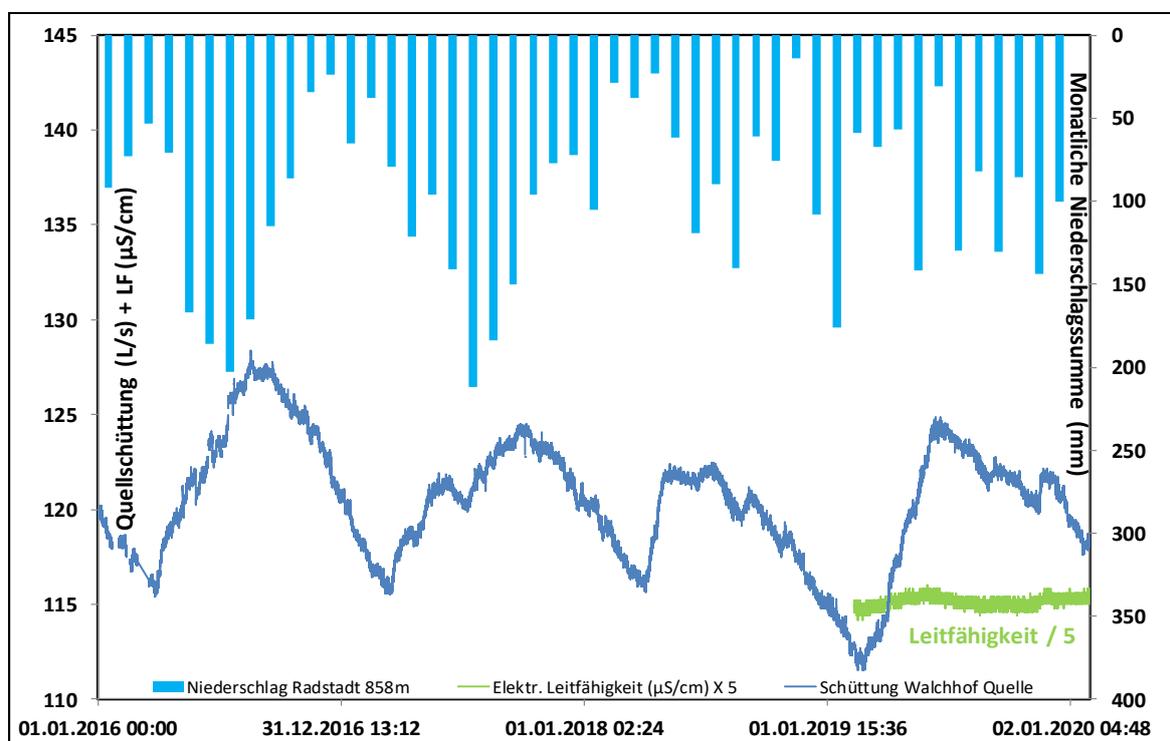


Abbildung 4: Monatliche Niederschlagssummen Radstadt (blaue Säulen; ZAMG und Hydrographischer Dienst), Quellschüttung (Gemeinde Radstadt) und Leitfähigkeit der gefassten Walchhof Hauptquelle (Moser-Jaritz ZT-GmbH, 2020).

Hydrogeologisches Modell

Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen (Moser-Jaritz ZT-GmbH 2012, 2016) sind folgende Schlussfolgerungen als Basis für das hydrogeologische Modell für die Walchhof Quellen maßgeblich:

- Die Wasseraustritte der Quellgruppe treten auf einem ausgedehnten Schwemmfächer an der orographisch linken Talflanke des Taurachtales zutage.
- Die Walchhof Quellen liegen im orographischen Einzugsgebiet eines Karbonatfensters des RD. Die dort auftretenden Dolomite, Rauhwacken, Kalke und Kalkschiefer weisen aufgrund ihrer teils hohen Verkarstungsfähigkeit eine, im Vergleich zu den im oberen Hangabschnitt des Nerggrabens auftretenden Quarzphylliten, deutlich höhere Gebirgsdurchlässigkeit auf.
- Im oberen Hangabschnitt des Nerggrabens (Quarzphyllite und deren Verwitterungsprodukte)

dominiert der Oberflächenabfluss gegenüber der Versickerung. Im mittleren Hangabschnitt überfließt der Nerggraben Gesteine des RD (Kalke, Rauhacken und Dolomite), die verkarstungsbedingt eine höhere Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, weshalb der Nerggraben bei Niedrigwasser (geschätzt bis zu 10 l/s Abflussfracht) in den Karbonaten vollständig versickert. Nur bei Mittel- und Hochwasser kann der Nerggraben bis zum Schwemmfächer abfließen, wobei er aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Schwemmfächermaterials nur bei außergewöhnlichen Hochwasserführungen bis zur Taurach vorstoßen kann.

- Das Karbonatfenster im unteren Teil des Nerggrabens ist Teil weiterer tektonischer Fenster, die einerseits am Hangfuß taleinwärts des Taurachtales bis nach Obertauern auftreten, zum anderen auch westlich des Projektstandortes außerhalb des orographischen Einzugsgebietes als sog. Lackenkogl-Mesozoikum beschrieben werden (Abb. 2).
- Nördlich des Projektstandortes treten keine Karbonatfenster im Taurachtal auf. Dort reicht der Quarzphyllit bis in den Talboden.
- Stichtagsmessungen der elektrischen Leitfähigkeit (el. LF) entlang der Taurach von Untertauern bis unterhalb der Walchhof Quellen sowie an den seitlichen Zubringern und Quellaustritten (Jakob, 2011) zeigen, dass ein Zufluss von hochmineralisierten Quellwässern (el. LF > 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) konzentriert auf einen Flussabschnitt von rd. 600 m Länge, der sich ausgehend von den Walchhof Quellen taleinwärts erstreckt, erfolgt. Hierdurch erhöht sich die Leitfähigkeit der Taurach von konstanten Werten um rd. 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ausgehend von Untertauern bis auf über 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ unmittelbar flussabwärts der Walchhof Quellen.

Aus den oben beschriebenen Punkten wurde das folgende Hydrogeologische Modell abgeleitet:

- Der Aquifer für die Walchhof Quellen sind Karbonate des RD (Kalke, Dolomite und Rauhacken), die am Hangfuß im Taurachtal auftreten und über weite Strecken von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockergesteinen überlagert werden.
- Der hohe Sulfatgehalt des Quellwassers wird auf die Lösung von Gips, welcher ursprünglich in den Rauhacken vorhanden war bzw. noch vorhanden ist, zurückgeführt.
- Die Karbonate im Nerggraben sind nicht der Hauptaquifer für das Wasser der Walchhof Quellen. Demzufolge liegt das Einzugsgebiet des Aquifers südlich der Fassungsanlage im Taurachtal.
- In den Karbonaten des Radstädter Deckensystems ist ein mächtiges, ergiebiges Bergwasservorkommen vorhanden. Dies resultiert aufgrund der hohen Gebirgsdurchlässigkeit der verkarstungsfähigen Ausgangsgesteine und deren großer oberflächlicher Verbreitung taleinwärts der Taurach bis in den Großraum der Gnadenalm bzw. Obertauern.
- Aufgrund der Tatsache, dass talauswärts der Walchhof Quellen der Bergwasserleiter in Form der Karbonate von gering durchlässigen Gesteinen der Radstädter Quarzphyllite abgeriegelt wird, ist das Bergwasser gezwungen, vergleichbar einer Überlaufquelle, dem hydraulischen Gradienten folgend, an der Oberfläche auszutreten.
- Dass dies punktförmig passiert, wird auf eine zum Teil lückenhafte Grundmoränenbedeckung am Hangfuß zurückgeführt, die aufgrund ihrer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit das Bergwasser in den unterlagernden Karbonaten abdämmt und gleichsam gespannte Bergwasserverhältnisse verursacht.
- An den Schwemmfächer des Nerggrabens ist ein weiteres Grundwasservorkommen („interflow“) gebunden, welches auf die Walchhof Quellen einen geringen Einfluss hat. Dieses Grundwasservorkommen, welches vom versickernden Nerggraben gespeist wird, fließt vermutlich auf der unterhalb der Schwemmfächerablagerungen stauenden Grundmoräne ab.

Isotopen und Gastracer

Probenahme

Das Quellwasser der gefassten Walchhof Hauptquelle wurde über ein Jahr (Feb. 2019-Feb. 2020) wöchentlich beprobt und davon wurden monatlich 15 Proben auf Sauerstoff-18 und Wasserstoff-2 Isotope ($\delta^{18}\text{O}$, ^2H) analysiert. Tritium/Helium-3, Kohlenstoff-13, Radiokarbon (^{14}C) Isotope und FCKWs wurden von den Proben im April und Oktober 2019 untersucht. Ebenso wurden die im Brandstattwaldfenster liegenden Hammerquellen an der östlichen Taurachtalflanke einmalig beprobt sowie 6 Mal, die auf 1.850 m über Obertauern liegende Plattenkarquelle, zur Höhen-Kalibrierung beprobt und analysiert (Tab. 1 und 2). Die Wassertemperatur, die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und der gelöste Sauerstoff wurden in einer Durchflusszelle vor Ort gemessen. Mittels glasklaren Kunststoffschlauchs wurde die Grundwasserprobe ohne Kontakt mit der Atmosphäre luftblasenfrei gefördert. Die eingeschlossenen Helium- bzw. Neongase wurden in Weichkupferrohren (Volumen ca. 40 ml) durch Abquetschen mittels Speziälschneiden als Doppelproben gewonnen. Das Grundwasser für FCKW/SF₆ bzw. ^{13}C - und ^{14}C -Messungen wurde ebenso ohne Luftkontakt in mit zwei Spezialventilen gesicherten, evakuierten 30 + 300 ml-Edelstahlbomben und 1 l-PE-Flaschen ohne Luftblase abgefüllt und unter Wasserbedeckung in einem Wassereimer mit einer Innenkappe und einem Drehdeckel verschlossen. Überdies wurde dieser Verschluss gleich anschließend mit einem Isolierband mehrmals umwickelt.

Analytik

Die stabilen Wasserisotopen der 15 hier gesammelten Wasserproben der Walchhof Hauptquelle wurden mit einem Picarro L2140i $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ Ultra High Precision Isotopic Water Analyser (Institute for Soil Physics and Rural Water Management (SoPhy), Universität f. Bodenkultur) analysiert.

Der hier angeführte Tritiumwert wurde am Austrian Institute of Technology (AIT) in Seibersdorf in einem Flüssigkeitsszintillationsmessgerät (LSC) gemessen. Die angegebene Aktivitätskonzentration (TE bzw. Bq/kg) bezieht sich auf die Probe zum Probenahmezeitpunkt.

Die im Wasser gelösten Edelgase Helium und Neon, sowie deren Isotopenverhältnisse, wurden am Institut für Physik der Universität Bremen mittels Quadrupol- und Sektorfeldmassenspektrometer analysiert. Die Messgenauigkeit beträgt für $^3\text{He}/^4\text{He}$ - und $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -Verhältnisse 0,4 % und für Isotopenkonzentrationen 0,7 % (2 σ -Vertrauensbereich).

Die im Rahmen dieser Studie im Grundwasser gelösten FCKW-Gase wurden im Labor des Instituts für Geowissenschaften der Universität Rennes mit ultra-reinem Stickstoff ausgetrieben und an einer „HaysepD“ Falle (10 cm, 1/8e inch diameter) gefangen und die Gasphase im Gaschromatographen mit einem Elektroneneinfang-Detektor gemessen.

Radiokarbon wurde in einem Beschleuniger-Massenspektrometer (AMS) untersucht und die stabilen Kohlenstoff-Isotopen-Verhältnisse ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) wurden im Gas Bench Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) (beide Beta Analytic Inc., Miami, Florida, USA) gemessen.

Sauerstoff-18/Wasserstoff-2 ($\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$)-Messungen

Die Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$) Werte der Walchhof Quelle stiegen über die letzten 23 Jahre (1996-2019) im Mittel um 0,3 ‰ an. Das ist häufig in österreichischen Quellen und auf den Klimawandel zurückzuführen (Kralik et al., 2018).

Im Jahre 2019 sinken vom Februar bis Juli die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von -12,96 auf -13,14 ‰ (Tab. 3, Abb. 5, Abb. 6). Abhängig von der Zusammensetzung der Winterniederschläge bzw. des Schneesmelzwassers ($\delta^{18}\text{O}$ -15 bis -20 ‰) bedeutet das eine **Zumischung von 3-10 %**.

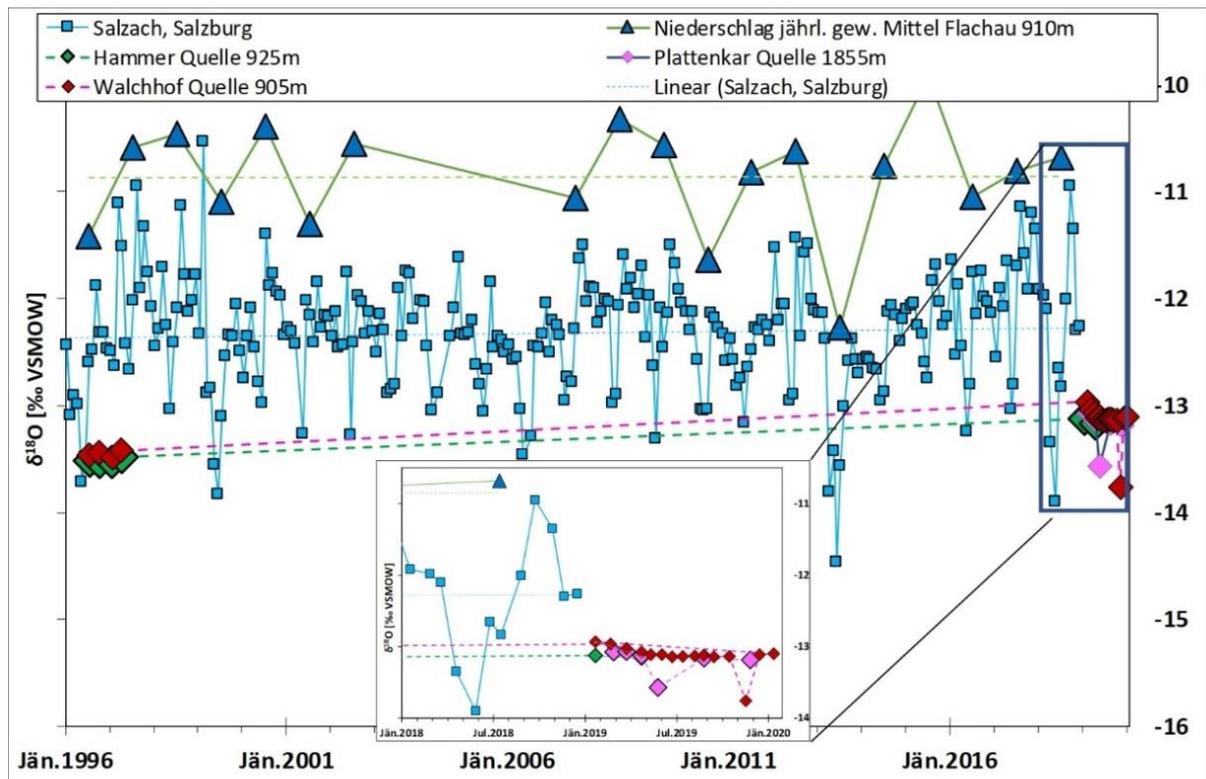


Abbildung 5: $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte der untersuchten Quellen im Vergleich zu den Jahresmittelwerten der Niederschlagsstation Flachau und den Monatswerten der Salzach (ANIP, 2019) von 1996-2018. Die Messwerte der Walchhof und Hammer Quelle von 1996-1997 stammen von Kralik et al. (2015).

Der mittlere jährliche $\delta^{18}\text{O}$ -Wert der Walchhof Quelle von $-13,12 \pm 0,18$ ‰ erlaubt es, die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes des Quellwassers abzuschätzen. Die hier untersuchte Plattenkar Quelle (Obertauern) mit eng definierter Einzugsgebietshöhe sowie die zehnjährigen Mittel von 5 meteorologischen Stationen (ANIP, 2019) erlauben es, eine Korrelation zwischen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert und Seehöhe des Niederschlags zu erstellen. Daraus lässt sich die mittlere **Höhenlage des Einzugsgebietes** der Walchhof Quellen mit **2000 ± 200 m** ableiten (Abb. 7).

Die 650 m weiter südöstlich liegenden Hammer Quellen haben vergleichbare $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und daher vermutlich ähnliche Einzugsgebietshöhen. Bloß deuten die erheblich erhöhten Leitfähigkeits- und Sulfatwerte (H₂O Fachdatenbank, 2019) der Hammer Quellen auf längere oder intensivere Kontakte mit gipsführenden Karstformationen hin.

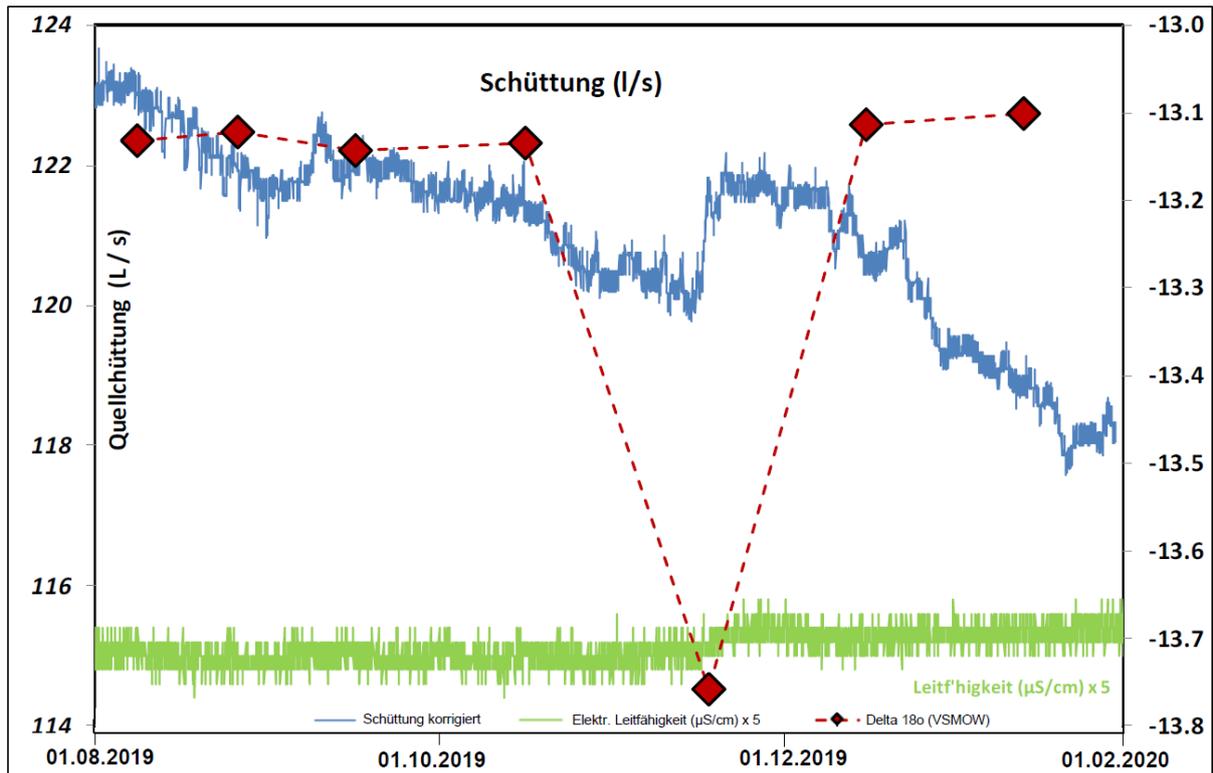


Abbildung 6: $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte im Vergleich zu den Schüttungs- und Leitfähigkeitsdaten der Walchhof Quelle im Zeitraum von August 2019–Jänner 2020. Am 18.11.2019 war der $\delta^{18}\text{O}$ -Messwert signifikant abgereichert, während gleichzeitig die Schüttung kurzfristig von 120 auf 122 l/s (ca. 2 %) und die elektrische Leitfähigkeit geringfügig (von 575 auf 577 $\mu\text{S}/\text{cm}$) anstieg.

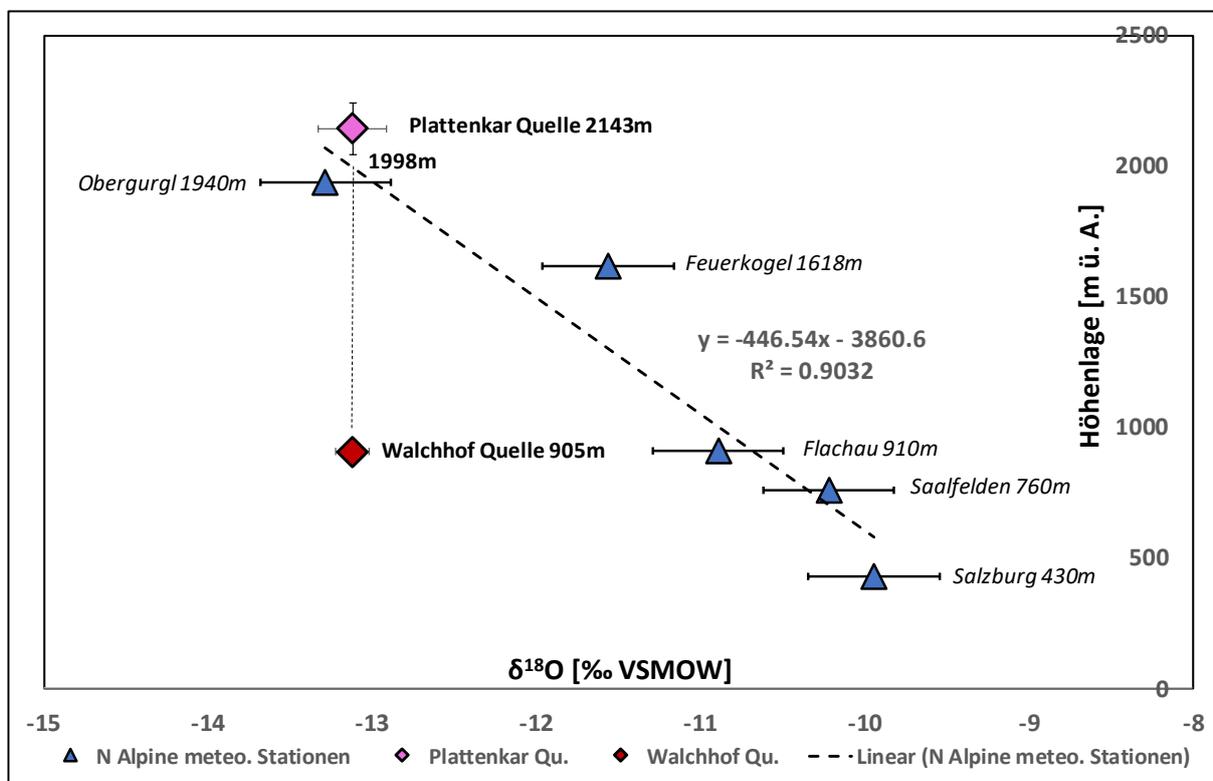


Abbildung 7: $\delta^{18}\text{O}$ vs. Höhenlage von meteorologischen Stationen im Raum Salzburg, Oberösterreich und Tirol in guter Übereinstimmung mit den mittleren Daten der Plattenkar Quelle (Obertauern). Daraus lässt sich die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes der Walchhof Quelle (2000 ± 200 m) abschätzen.

Tritium- und Helium-3/Helium-4 Messungen

Der Tritiumgehalt der Walchhof Hauptquelle mit 5,2 Tritiumeinheiten (TE) ist geringer als der gegenwärtige Niederschlag an den meteorologischen Stationen Flachau und Saalfelden bzw. im Flusswasser der Salzach. Die Abnahme der hohen Tritiumwerte in den Jahren 1996/97 sowohl der Walchhof als auch der Hammer Quelle ist durch den radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von 12,32 Jahren) und die komplexen Mischungsverhältnisse im Einzugsgebiet zu erklären. Dank dieser alten Tritiumdaten lässt sich mittels „lumped parameter“ Modellen wie dem Exponential Piston-flow (EPM) und dem Dispersions Modell (DM) nach Jurgens (2019) wenigstens für den jüngeren tritiumhaltigen Anteil, eine „mittlere Verweilzeit“ im Untergrund von 11 Jahren berechnen (Tab. 3, Abb. 8).

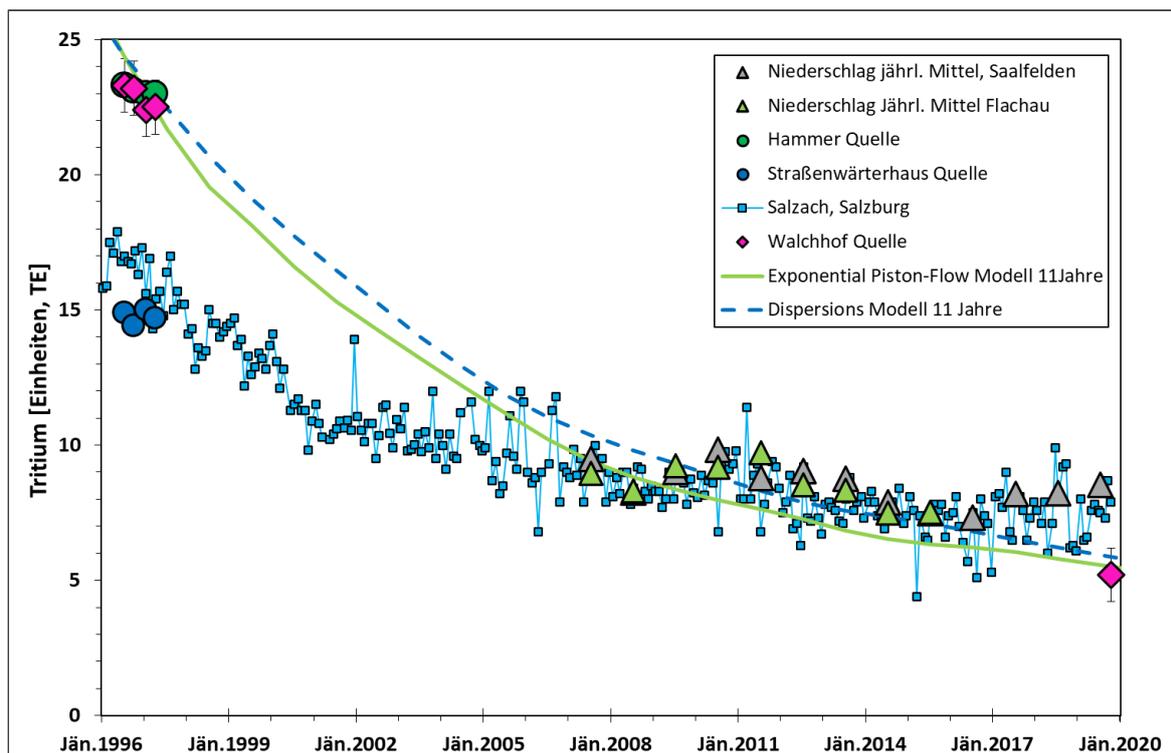


Abbildung 8: Tritium (^3H)-Messwerte der untersuchten Quellen im Vergleich zu den Jahresmittelwerten und den mittleren Jahreswerten der Niederschlagsstationen Flachau und Saalfelden (ANIP, 2019) von 2007-2018. Die Messwerte der Quellen der Jahre 1996-1997 stammen von Kralik et al. (2015). Die Linien zeigen die Altersentwicklung (11 Jahre mittlere Verweilzeit) des Exponential Piston-flow Modells (EPM in grün) und des Dispersion Modells (DM in blau).

Da Tritium zum Edelgas Helium-3 zerfällt, kann man bei der gleichzeitigen Messung beider mit den gleichen „lumped parameter“ Modellen für den jüngeren tritiumhaltigen Anteil eine mittlere Verweilzeit berechnen. Dies ergibt jedoch ein signifikant höheres Modellalter von 23 Jahren (Tab. 4, Abb. 9). Daher ist die beste Schätzung des **jüngeren Anteils des Walchhof Quellwassers 10 bis 20 Jahre**.

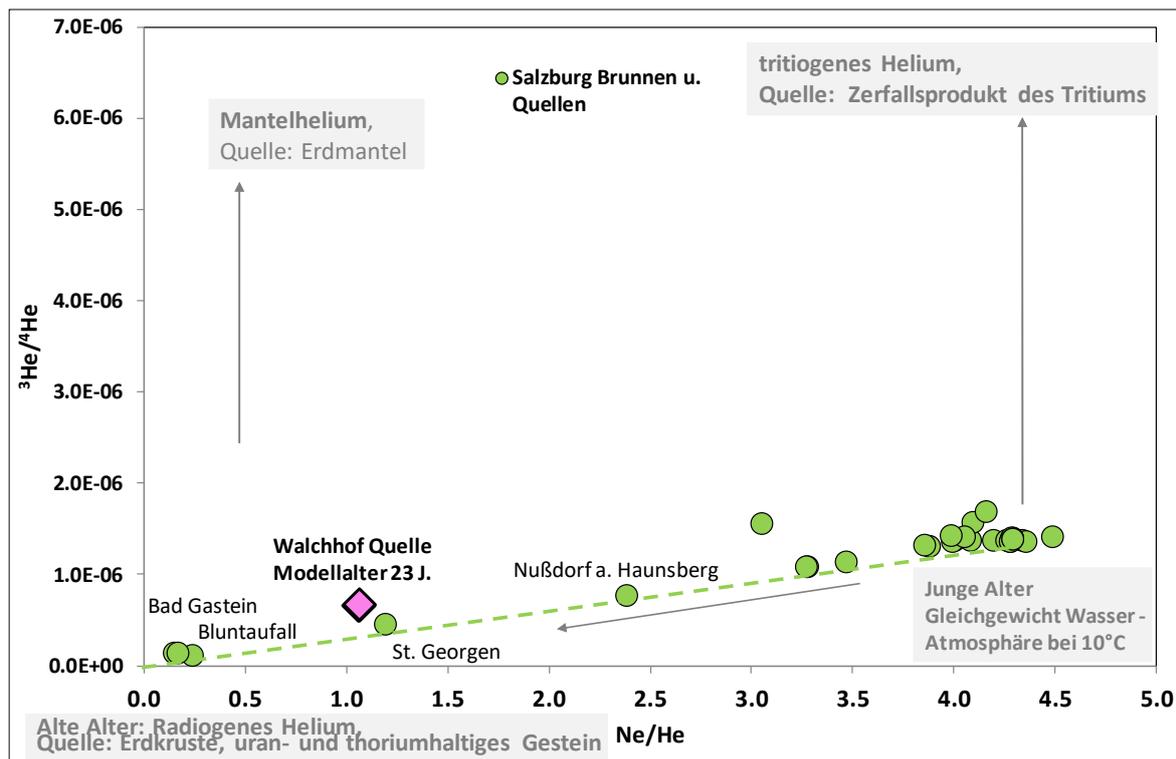


Abbildung 9: Neon/Helium vs. Helium-3/Helium-4-Verhältnisse in Salzburger Brunnen- und Quellwässern. Identische hohe Helium-4-Gehalte im April und Oktober 2019 in den Walchhof Quellwässern bestätigen einen konstanten hohen Anteil an sehr alten Wässern. Das Modellalter des jüngeren, tritiumhaltigen Anteils beträgt 23 Jahre.

FCKW-11, FCKW-12, FCKW-113 und SF₆

Die Abschätzung der mittleren Verweilzeit des Quellwassers beruht darauf, dass sich die jeweiligen Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW = CFC)-Konzentrationen in der Atmosphäre in dem versickernden Niederschlagswasser entsprechend der Temperatur und Höhenlage lösen. Bei Kenntnis der Konzentrationsentwicklung (USGS, 2019) kann der Zeitpunkt der Einleitung ins Quellwasser abgeschätzt werden. Wenn die gemessenen Konzentrationen nicht nahe der Konzentrationsentwicklung liegen, dann gab es nahe dem Einzugsgebiet eine anthropogene Kontamination oder es kam zur Mischung verschieden alter Quellwässer.

Im Fall der Walchhof Quellen liegen die FCKW-Messwerte nahe einer Mischungslinie zwischen einem alten CFC-freien (ca. > 80 Jahre) und einem jungen FCKW-haltigen Anteil (Tab. 4, Abb. 10 A-C). Je nachdem bei welcher Konzentration man den jungen Anteil (1995-2019) annimmt, so lässt sich ein Anteil von **40-58 % an altem FCKW-freien (ca. > 80 Jahre) Quellwasser berechnen.**

Die Analyse der Schwefelhexafluorid (SF₆)-Konzentration von 39,7 (fmol/kg) bezeugt nur einen signifikanten Überschuss, dessen Daten zur Alterseinschätzung nicht genutzt werden können. Vermutlich sind Kristallingesteine im Einzugsgebiet eine natürliche Quelle dieses SF₆-Überschusses.

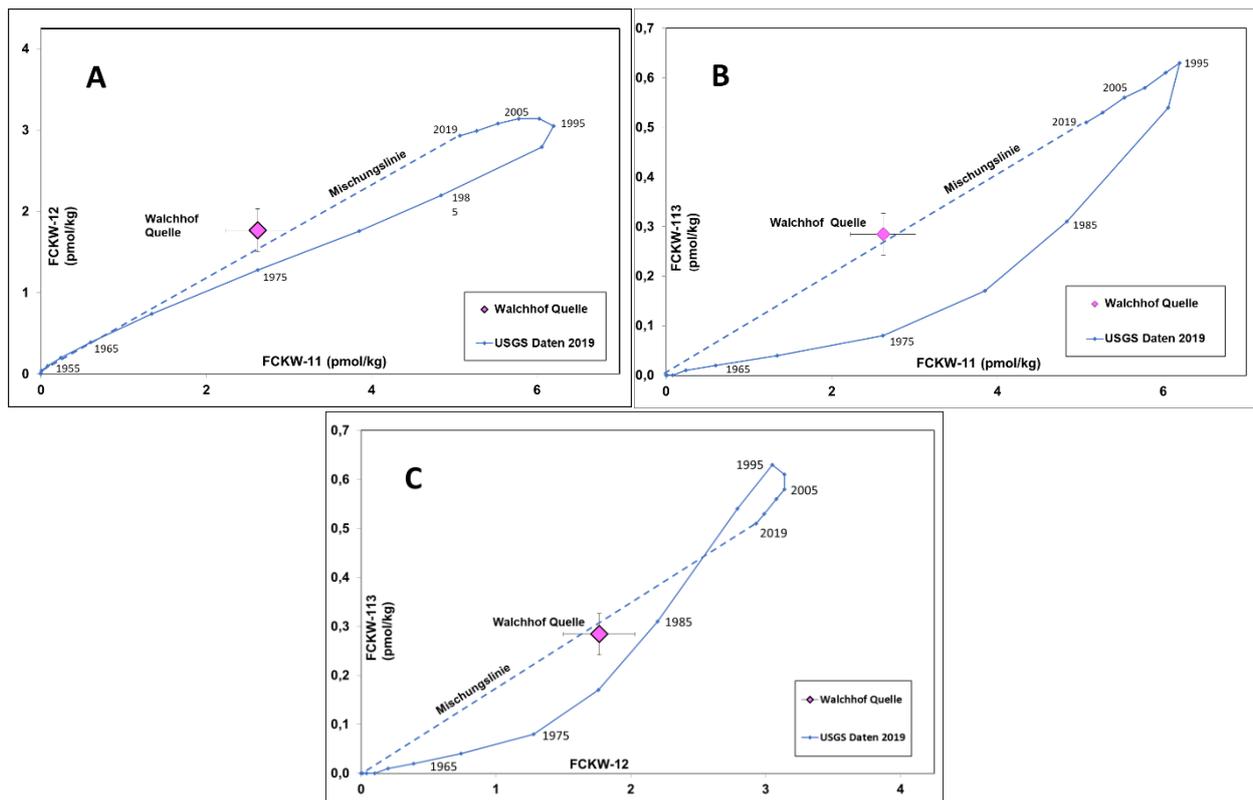


Abbildung 10: FCKW-11, FCKW-12 und FCKW-113 gelöst in Wasser (pmol/kg) bei 4 °C und 2000 m Höhe berechnet nach den Konzentrationsmessungen des USGS (2019) über die Jahre 1940–2019 und die Konzentration im Walchhof Quellwasser. Mischungslinie zwischen FCKW-freien alten und jungen Wässern. A) FCKW-11 vs. FCKW-12, B) FCKW-11 vs. FCKW-113, C) FCKW-12 vs. FCKW-113.

Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$) und Radiokarbon (^{14}C) –Messungen

Der Kohlenstoff-13 des anorganischen gelösten Kohlenstoffs (DIC) im Grundwasser wird gemessen, um abschätzen zu können, wie viel von dem ursprünglich infiltrierten Kohlenstoff durch die Lösung mit ^{14}C -freien Karbonatgesteinen verdünnt wird. Die Werte der Grundwässer des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molassezone, zu Vergleichszwecken dargestellt, deuten darauf hin, dass, je länger die Wässer unterwegs sind (geringere ^{14}C -Gehalte), desto mehr ^{14}C -freier Kohlenstoff wird aus den Karbonaten gelöst und die $\delta^{13}\text{C}$ -Werten verschieben sich mehr zu den für marine Karbonate typischen Wert von 0 ‰. Das hier untersuchte Walchhof Quellwasser liegt auf einem ähnlichen Trend (Tab. 3, Abb. 11 A).

Die Darstellung der Tritiumwerte gegen die Radiokarbonwerte (in Prozent modernen Kohlenstoffs) zeigt, dass viele der hier untersuchten Grundwässer des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molasse eine Mischung aus „jüngeren“ tritiumhaltigen Wässern (jünger als ca. 70 Jahre) und einem sehr alten tritiumfreien Grundwasser sind. Nach der $\delta^{13}\text{C}$ -Korrektur des Radiokarbonmesswerts von 44,4 % modernen Kohlenstoffs wird eine Verschiebung auf 71 % berechnet. Der korrigierte Wert passt gut zu den Trends der oben erwähnten Grundwassergebiete (Abb. 11 B).

Berechnet man eine mittlere Verweilzeit mit einem **Radiokarbonwert von 71 % modernen Kohlenstoffs so kommt man auf 1500 bis 3000 Jahre**. Berücksichtigt man jedoch die Erkenntnisse der FCKW-Untersuchungen, dass der alte Anteil der Quellwassermischung zwischen 40-58 % betragen

könne, dann muss man davon ausgehen, dass dieser alte Anteil eine Verweilzeit von mehr als 10.000 Jahren haben kann.

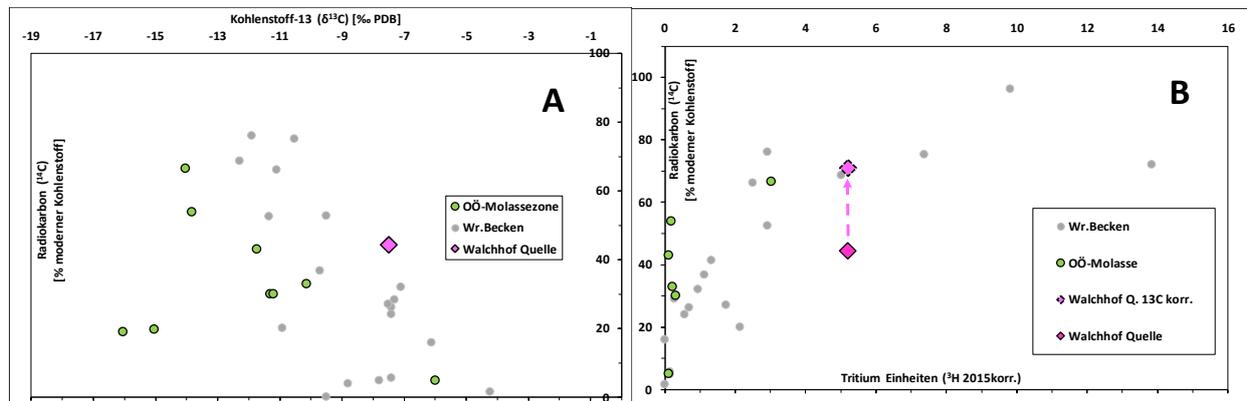


Abbildung 11: A) Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$) gegen Radiokarbon (^{14}C)-Messungen und B) Tritium (^3H) gegen Radiokarbon (^{14}C)-Messungen des gelösten anorganischen Kohlenstoffs der Walchhof Quelle. Zum Vergleich werden Werte von Grundwässern des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molassezone dargestellt. Die Tritiumwerte wurden zu Vergleichszwecken auf das Jahr 2015 zerfallskorrigiert.

Wasserbilanz und hydrogeologisches Einzugsgebiet

Mit Hilfe der neuen Erkenntnisse aus den Isotopen- und Gastraceruntersuchungen (Kralik, 2020) sowie den durchgeführten Wasserbilanzierungen konnte das potentielle Einzugsgebiet des Wasserspenders nach hydrogeologischen Kriterien eingegrenzt werden. Demnach sind Flächen um rd. 2000 ± 200 m ü. A. (Abb. 7) mit verkarstungsfähigen Gesteinen (i. W. Karbonate) des RD für die Grundwasserneubildung bzw. die Alimentation der Walchhof Quellen maßgebend.

In einem GIS-Projekt wurden daher Karbonatflächen des RD im potentiellen Einzugsgebiet der Walchhof Quellen mit dem Geländemodell bzw. dem Höhenbereich über 1.800 m verschnitten, wobei drei Höhenstufen ausgeschieden wurden (Abb. 12). Aufgrund der strukturellen und tektonischen Rahmenbedingungen, der hydrographischen bzw. morphologischen Gegebenheiten (Entwässerungsstrukturen mit abflusslosen Senken, Dolinen, Uvalas, etc.) sowie der durchgeführten Wasserbilanzierungen wurde das potentielle hydrogeologische Einzugsgebiet der Walchhof Quellen im Bereich des Mesozoikums von Obertauern schließlich nach Süden über den Hauptkamm vom Pleißingkeil im Westen bis zur Kesselspitze im Osten erweitert (Abb. 12). Beispielsweise stellt das Wildseekar und der Pleißingkessel eine teils Seen erfüllte Aneinanderreihung von Großdolinolen ohne oberirdischen Abfluss dar (Nagl, 1974). Eine maßgebliche Alimentation aus dem Lackenkogel-Mesozoikum im Westen der Walchhof Quellen kann aufgrund der ausgeglichenen Wasserbilanz für das Zauchenbachtal ausgeschlossen werden (Mjp Ziviltechniker GmbH, 2020).

Das bedeutet, dass auch Niederschlagswässer, die auf die verkarsteten Regionen südlich des orographischen Einzugsgebiets fallen und unterirdisch entsprechend dem dominierenden Nord Schichteinfallen in das Taurachtal abfließen, berücksichtigt werden. In jenen Abschnitten, die in den entsprechenden Höhenstufen über 1.800 m nicht von Karbonaten aufgebaut werden, wurde das hydrogeologische Einzugsgebiet mit dem orographischen Einzugsgebiet ident festgelegt.

Somit ist das maßgebliche Einzugsgebiet südlich der Walchhof Quellen in mindestens 10 bis 11 km Entfernung im Raum Obertauern anzusiedeln, was wiederum mit den teils (sehr) hohen Wasseraltern korreliert. Eine mögliche Erklärung für die Zerteilung in einen relativ älteren Anteil und einen sehr alten Anteil der Wässer, ist möglicherweise auf die Struktur des Karstaquifers zurückzuführen. Hauptfließwege sind in Form von verkarstungsbedingt aufgeweiteten, höhlen- und röhrenförmigen Hohlräumen vorhanden, untergeordnete Fließwege an Trennflächen mit geringen Öffnungsweiten gebunden. Entstammen die Wässer also demselben Haupteinzugsgebiet im Raum Obertauern, so kann für die jüngeren Wässer (10-20 Jahre) eine mittlere Mindestfließgeschwindigkeit in der Größenordnung von wenigen Metern pro Tag (rd. 1,4 bis 2,7 m/Tag) und für den (sehr) alten Wasseranteil (1.500 bis 3.000 Jahre) von wenigen Zentimetern am Tag (rd. 1 bis 2 cm/Tag), angenommen werden.

Auch der Einfluss sehr junger Wässer konnte in den neueren Untersuchungen erneut bestätigt werden (Abb. 5, Abb. 6), was für eine Beeinflussung durch im Nerggraben bzw. auf dem Schwemmfächer periodisch versickernde Oberflächenwässer im Zuge der Schneeschmelze bzw. von Starkniederschlägen spricht.

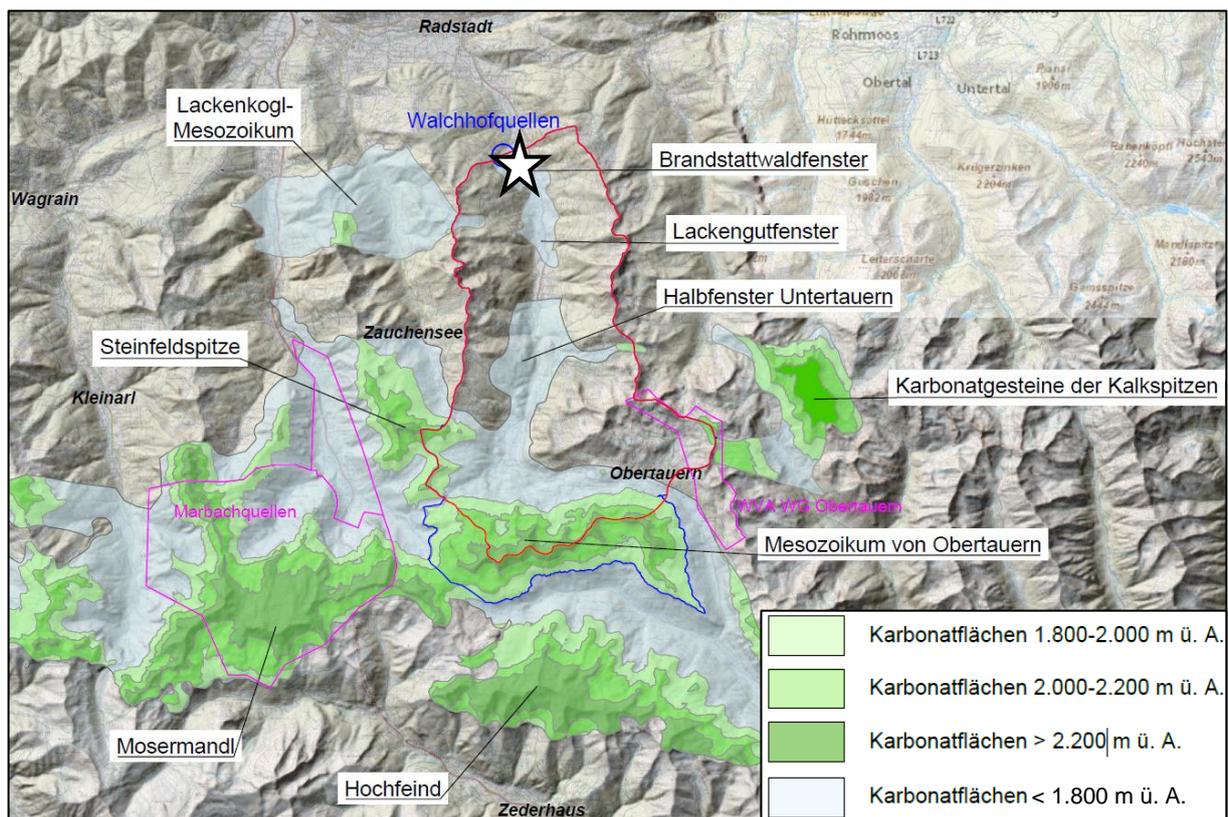


Abbildung 12: Karbonatvorkommen im Umfeld der Walchhof Quellen (Stern) untergliedert nach Höhenstufen mit dem orographischen Einzugsgebiet der Taurach auf Höhe der Walchhof Quellen (rot), dem nach Süden erweiterten hydrogeologischen Einzugsgebiet (blau) und bestehenden Schongebieten (pink).

Schongebiet

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse konnte das bestehende hydrogeologische Modell, wie oben beschrieben, im Hinblick auf die Vulnerabilität der Walchhof Hauptquelle im Wesentlichen bestätigt werden.

Die älteren Wasseranteile (Jahrzehnte bis sehr alte Wässer), die den Großteil der Quellschüttung ausmachen, sind aufgrund des hohen Alters und der langen Verweilzeiten bereits gut geschützt gegen Verunreinigungen bzw. anthropogene Beeinflussungen. Dabei sind auch die geringe Besiedlung sowie die Ursprünglichkeit im Haupteinzugsgebiet hervorzuheben, weshalb eine Ausdehnung des Schongebietes bis in den Raum Obertauern aus fachlicher Sicht nicht erforderlich ist.

Da die mittlere Einzugsgebietshöhe in (hoch-)alpinen Höhenlagen ermittelt wurde, ist eine maßgebliche Alimentation des Karstaquifers im Bereich der beiden Karbonatfenster im Talbodenbereich nicht gegeben. Zum einen werden die beiden Karbonatfenster über weite Strecken von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockergesteinen überlagert, in denen zumindest im Taltiefsten ein Begleitgrundwasserkörper der Taurach gebunden ist, wodurch der gegenständliche Karstaquifer gegenüber Einträgen und Verunreinigungen von der Oberfläche gut geschützt ist. Zum anderen beginnt das Lackengutfenster in mehr als 1 km Entfernung zu den Walchhof Quellen und sind entsprechend lange Verweilzeiten bis zu den Walchhof Quellen gegeben. Daher besteht im Talbodenbereich der beiden Karbonatfenster ein (Rest-)Risiko in quantitativer Hinsicht bei tiefreichenden, bis in den Karstwasserkörper reichenden Bohrungen, da hierdurch theoretisch ein Überlauf bzw. Auslass (artesisch gespannt) geschaffen werden kann.

An den nicht besiedelten und nur durch überwiegend nicht öffentlich zugängliche Forstwege erschlossenen Hangflanken im Bereich der beiden Karbonatfenster (Brandstattwald- und Lackengutfenster) sollte nach Möglichkeit der derzeitige Ist-Zustand mit extensiver Weidenutzung sowie moderater Waldbewirtschaftung weitestgehend erhalten werden, wobei die Gefährdung für die Walchhof Quellen außerhalb des engeren Schongebiets (s. o.) als gering beurteilt wird.

Ein „engeres“ Schongebiet, welches den Nerggraben und das Brandstattwaldfenster im Westen der Taurach samt dem orographischen Einzugsgebiet bis in die Kammregion westlich davon einschließt, wurde durch die Erkenntnisse aus den Isotopenuntersuchungen, aus denen die Zumischung von Wässern aus einem sehr nahe gelegenen Einzugsgebiet mit kurzen Verweilzeiten von wenigen Tagen bis Wochen hervorgeht, bestätigt. Diese sehr jungen Wässer stellen für das Quellwasser das größte Gefahrenpotential in qualitativer Hinsicht dar, wobei hier im Wesentlichen Störfälle mit mineralölbetriebenen Maschinen und Fahrzeugen im Bereich der Forstwege sowie im Zuge der Waldbewirtschaftung anzuführen sind.

Schlussfolgerungen

Sorgfältige geologische Kartierungen, hydrogeologische Aufnahmen (Abflüsse, Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen), hydrologische Wasserbilanzen sowie eine Kombination von Wasser-Isotopen- und Gastracerversuchen ermöglichen ein plausibles hydrogeologisches Modell auch für komplexe alpine Karstquellen zu erstellen. Bezüglich der zeitweisen Zumischung von geringen Anteilen sehr junger, potenziell mikrobiologisch belasteter Wässer erwiesen sich die kleinräumigen Fluoreszenztracerversuche sowie die kontinuierliche Aufzeichnung der Quellschüttung und deren Leitfähigkeit in Kombination mit regelmäßigen Isotopenuntersuchungen als erfolgreich.

Tabelle 1: Lokalität und Eigenschaften der Grund- und Quellwassermessstellen.

MST-Bezeichnung	Bezeichnung/Probe- nahmeort	Gemeinde	WGS84	WGS84	Höhe ROK (m)	Durchmesser der Messstelle (mm)	Bemerkungen zur Messstelle
			Länge (Grade)	Breite (Grade)			
1 Walchhof Quelle							
	KK52207182						
Walchhof Quelle	Hahn Brunnenstube d. Quellsammel-schacht	Radstadt	13,49627	47,34674	905	2000	(2088/10 Moser & Jaritz 2016)
Walchhof Quelle SE	Quelle südöstl. Brunnenstube	Radstadt	13,49659	47,34669	905	1000	(2091/10 Moser & Jaritz 2016)
Kleinkraftwerk Stiegler	Auslass	Radstadt	13,49760	47,34912	875	1900	(2083/10 Moser & Jaritz 2016)
Nerggrabenbach		Radstadt	13,49644	47,3454	920	2000	(2084/10 Moser & Jaritz 2016)
Taurach		Radstadt	13,49795	47,34783	870	10000	
2 Hammer Quelle							
	KK52207212						
Hammer Quelle Süd	Quellaustritt	Untertauern	13,5029	47,34236	925	2000	
Hammer Quelle Nord	Quellaustritt	Untertauern	13,5029	47,34236	915		
3 Straßenwärter- haus Quelle							
	KK52207272						
	Quellaustritt	Obertauern	13,51999	47,95897	1590		
4 Plattenkar Quelle							
		Obertauern	13,57124	47,25384	1855		

Tabelle 2: Lokalität, Datum und Vor-Ort-Messungen der Brunnen- und Quellwasserproben.

MST- Bezeichnung	Bezeichnung/Probe- nahmeort	Gemeinde	Datum (dd.mm.JJJJ)	Uhrzeit (hh:mm)	Wetter	Schüttung (L/s)	Wasser- temperatur (°C)	Leitfähigkeit (µS/cm)	pH	O ₂ (mg/L)	Bemerkungen
1 Walchhof Quelle	KK52207182										
W01	Walchhof Q	Radstadt	21.02.2019	13:00	-	-	-	585	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W07	Walchhof Q	Radstadt	25.03.2019	08:00	-	-	-	586	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
	Walchhof Q	Radstadt	24.04.2019	13:00	Sonne	119,3	6,8	590	7,41	5,51	Kralik ³ He, CFC, SF ₆ , ¹⁴ C, Bakteriologie Probenahme
W14	Walchhof Q	Radstadt	13.05.2019	09:30	Regen	-	-	602	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W17	Walchhof Q	Radstadt	04.06.2019	11:15	Sonne	-	-	602	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W20	Walchhof Q	Radstadt	24.06.2019	09:30	Sonne	-	-	603	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W23	Walchhof Q	Radstadt	15.07.2019	15:30	Sonne	-	-	607	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W26	Walchhof Q	Radstadt	08.08.2019	11:00	Sonne	-	-	608	-	-	Hr. Lochner; 100 ml PE Brunnenstube
W29	Walchhof Q	Radstadt	26.08.2019	07:30	Wolke	-	-	608	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W32	Walchhof Q	Radstadt	16.09.2019	07:00	Wolke	-	-	608	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
	Walchhof Q	Radstadt	16.10.2019	11:11	Sonne	121	-	598	-	-	M. Kralik

MST- Bezeichnung	Bezeichnung/Probe- nahmeort	Gemeinde	Datum (dd.mm.JJJJ)	Uhrzeit (hh:mm)	Wetter	Schüttung (L/s)	Wasser- temperatur (°C)	Leitfähigkeit (µS/cm)	pH	O ₂ (mg/L)	Bemerkungen
W41	Walchhof Q	Radstadt	18.11.2019	08:00	Wolken	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W45	Walchhof Q	Radstadt	16.12.2019	08:00	Wolken	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
W49	Walchhof Q	Radstadt	13.01.2020	08:00	Sonne	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml Brunnenstube
	Walchhof Q Südost	Radstadt	22.01.2019	13:40	Sonne	-	-	594	-	-	M. Kralik
	Walchhof Q Südost	Radstadt	24.04.2019	13:30	Sonne	-	6,8	584	7,86	-	M. Kralik
Kleinkraftwerk Stiegler	Auslass	Radstadt	24.04.2019	14:30	Sonne	300	7,6	569	7,96	-	M. Kralik
Nerggrabenbach		Radstadt	24.04.2019	13:55	Sonne	100	4,9	56	8,05	-	M. Kralik
Taurach		Radstadt	24.04.2019	14:20	Sonne	10000	5,8	257	-	-	M. Kralik
2 Hammer Quelle	KK52207212										
	Hammer Quelle Süd	Unter- tauern	22.01.2019	14:45	-	20	-	875	-	-	M. Kralik
	Hammer Quelle Süd	Unter- tauern	24.04.2019	17:01	-	30	6,9	885	7,65	-	M. Kralik
	Hammer Quelle Nord	Unter- tauern	24.04.2019	17:25	-	20	7,0	893	7,56	-	M. Kralik

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	50/100
----------------------------	----------------	---------	------	--------

MST- Bezeichnung	Bezeichnung/Probe- nahmeort	Gemeinde	Datum (dd.mm.JJJJ)	Uhrzeit (hh:mm)	Wetter	Schüttung (L/s)	Wasser- temperatur (°C)	Leitfähigkeit (µS/cm)	pH	O ₂ (mg/L)	Bemerkungen
3											
Straßenwärter- haus Quelle	KK52207272										
Straßenwärter- haus Quelle		Obertauern	24.04.2019	16:18	-	10	4,8	143	7,13	-	M. Kralik
4 Plattenkar Quelle											
P-01	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.02.2019	10:30	-	-	-	111	-	-	Hr. Lochner; 100 ml
P-02	Plattenkarquelle 1	Obertauern	25.03.2019	11:30	leichter Schneefall	-	-	109	-	-	Hr. Lochner; 100 ml
P-03	Plattenkarquelle 1	Obertauern	24.04.2019	09:00	bewölkt	-	-	78	-	-	Hr. Lochner; 100 ml
P-04	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.05.2019	08:15	bewölkt	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml
P-05	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.08.2019	08:30	bewölkt	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml
P-06	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.11.2019	09:00	sonnig	-	-	-	-	-	Hr. Lochner; 100 ml

MST-Bezeichnung	Bezeichnung/Probenahmeort	Gemeinde	Datum (dd.mm.JJ)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{2}\text{H}$	^3H	^3H	$\delta^{13}\text{C}$	^{14}C	^{14}C
				VSMOW (‰)	VSMOW (‰)	(TE)	(TE)	PDB (‰)	(pmc)	(pmc)
	Hammer Quelle Süd	Untertauern	22.01.2019	-13,12	-93,0	-	-	-	-	-
	Hammer Quelle Süd	Untertauern	24.04.2019	-13,16	-93,1	-	-	-	-	-
3 Straßenwärterhaus Quelle	KK52207272									
Straßenwärterhaus Quelle		Obertauern	24.04.2019	-13,48	-95,2	-	-	-	-	-
4 Plattenkar Quelle										
P-01	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.02.2019	-13,07	-91,3	-	-	-	-	-
P-02	Plattenkarquelle 1	Obertauern	25.03.2019	-13,07	-91,2	-	-	-	-	-
P-03	Plattenkarquelle 1	Obertauern	24.04.2019	-13,12	-91,7	-	-	-	-	-
P-04	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.05.2019	-13,57	-95,0	-	-	-	-	-
P-05	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.08.2019	-13,16	-91,6	-	-	-	-	-
P-06	Plattenkarquelle 1	Obertauern	27.11.2019	-13,19	-92,5	-	-	-	-	-

VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water; pmc Prozent moderner Kohlenstoff

TE: Tritium Einheit ($[^3\text{H}/^1\text{H}] = \sim 10^{-18} = 0,11919 \text{ Bq/kg}$)

PDB: Pee Dee Belemnite Standard

MU: Mittlere Unsicherheit

Tabelle 4: Edel- und Spurengasanalysen der Quellwasserproben.

<i>MST-Bezeichnung</i>	<i>Probe- nahme- datum</i>	$^3\text{He}/^4\text{He}$	^3He (cm^3 STP/kg)	^4He (cm^3 STP/kg)	Ne (cm^3 STP/kg)	Ne/He	FCKW- 11 ($\text{pmol}/$ kg)	FCKW-11 MU ($\text{pmol}/$ kg)	FCKW- 12 ($\text{pmol}/$ kg)	FCKW-12 MU ($\text{pmol}/$ kg)	FCKW-113 (pmol/kg)	FCKW-113 MU (pmol/kg)	SF_6 (fmol/kg)	SF_6 MU (fmol/kg)
1 Walchhof Quelle														
	24.04.2019	6,65E-07	1,70E-05	2,55E-04	2,71E-04	1,06	2,62	0,07	1,77	0,32	0,28	0,01	39,69	4,16
	16.10.2019	6,66E-07	1,54E-05	2,32E-04	2,46E-04	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-

STP: Standard Bedingungen für Temperatur und Druck [273,15° Kelvin und 101,325 kPa]

MU: Mittlere Unsicherheit

Literaturverzeichnis

- ANIP (2019): Austrian Network of Isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H) in Precipitation and Surface waters.- Ministry of Agriculture, Forestry, Environments and Water Management, Offices of Provincial Governments, Austrian Institute of Technology and Environmental Agency Austria, Vienna; <http://www.umweltbundesamt.at>.
- Geologische Bundesanstalt (2005): Geologische Karte von Salzburg, 1:200.000, Wien.
- H₂O Fachdatenbank (2019): Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) BGBl. Nr. 479/2006 i.d.g.F.- BMLFUW, Sektion VII/Abteilung 1 Nationale Wasserwirtschaft, Ämter der Landesregierungen; <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/>.
- Hydrographischer Dienst (2019): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung IV/4 - Wasserhaushalt (HZB), Marxergasse 2, 1030 Wien, Österreich; <http://ehyd.gv.at/>.
- Jakob, C. (2011): Hydrogeologische Verhältnisse der Walchhofquellen im Taurachtal (Salzburger Land).- unveröff. Masterarbeit, Technische Universität München, 82 S., München.
- Jurgens, B. (2019): TracerLPMM; <https://github.com/bcjurgens>.
- Kralik M., Benischke R., Leis A., Heiss G., Wyhlidal S., Grath J., Hadrbolec M., Zieritz I., Philippitsch R. (2015). Wasserisotopenkarte Österreichs.- Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. <https://secure.umweltbundesamt.at/webgis-portal/isotopen/map.xhtml>.
- Kralik, M., Wyhlidal, S., Brielmann, H. (2018): Long-term ^{18}O -Records in Precipitation and Global Warming.- Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8485, 2018, EGU General Assembly. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-8485.pdf>
- Kralik, M. (2020): Bestimmung der Einzugsgebietshöhe und des Wasseralters (Mittlere Verweilzeiten) der Walchhof Quelle mittels Isotopenmessungen ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$, ^3H , ^{14}C) und Gastracern (^3He , FCKW11,-12,-113, SF₆).- unveröff. Bericht, 29 S., Wien.
- Mjp Ziviltechniker GmbH (2020): Ergänzung Schongebietsvorschlag (GZ 1101007).- unveröff. Bericht, 21 S., Saalfelden.
- Moser-Jaritz ZT-GmbH (2012): Schutzgebietsvorschlag Walchhofquellen.- unveröff. Bericht, 41 S., Saalfelden.
- Moser-Jaritz ZT-GmbH (2016): Schongebietsvorschlag Walchhofquellen.- unveröff. Bericht, 52 S., Saalfelden.
- Nagl, H. (1974): Hydrologische Untersuchungen im oberen Ennsgebiet.- Mitt. nat.-wiss. Ver. Stmk, 104, 39-56, Graz.
- Rossner, R. (1979): Gebirgsbau und alpidische Tektonik am Nordrand des Tauernfensters (Nördliche Radstädter Tauern, Österreich).- Jb. Geol. B.-A., 22, 251-387, Wien.
- USGS (2019): Atmospheric mixing ratios of CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-113, and SF₆ in North America (NH).- USGS CFC Lab Age Dating Group 8; https://water.usgs.gov/lab/software/air_curve/_190307.