

Anwendung hydrochemischer Modellrechnungen zur Bestimmung von Infiltrationsgebieten – Fallbeispiel Reißeck (Oberkärnten, Österreich)

Sylke Hilberg

Eingang des Beitrages: 5. 7.2010 / Online veröffentlicht: 18. 1.2011
© Springer-Verlag 2011

Zusammenfassung Im Rahmen der Beurteilung der Umweltverträglichkeit von geplanten Stollenbauwerken innerhalb des Zentralgneises der Alpen war die Frage der potenziellen quantitativen Gefährdung von Quellen zu klären. Dazu war abzuschätzen, in welcher geologischen Großeinheit (Zentralgneis oder Tauernschieferhülle) das jeweilige Infiltrationsgebiet liegt.

Durch die Anwendung hydrochemischer Modellrechnungen zur Bestimmung von Kalzitsättigungsindex und CO₂-Partialdruck konnten fünf Gruppen von Wässern herausgearbeitet werden: (1) Infiltration unter Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone, deutlicher Einfluss von Kalkglimmerschiefern; (2) Infiltration unter geringer Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone, Einfluss von Kalkglimmerschiefern und möglicherweise Zentralgneis; (3) Infiltration unter Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone, kein Einfluss von Kalkglimmerschiefern; (4) Infiltration ohne Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone, kein Einfluss von Kalkglimmerschiefer, Kristallineinfluss möglich; (5) Infiltration ohne Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone, keine Beeinflussung durch Kluftaquifer-Oberflächenwässer.

Die Methode stellt vor allem in Gebieten mit ausgeprägter Morphologie und damit variierenden Vegetationszonen ein gutes Hilfsmittel zur qualitativen Unterscheidung von Infiltrationsgebieten auf Basis relativ weniger und kurzfristig verfügbarer Daten dar und konnte zur Abschätzung von Gefährdungspotenzialen herangezogen werden.

Use of hydrochemical modelling for determination of infiltration areas—case study Reißeck (Upper Carinthia, Austria)

Abstract The potential environmental impact of planned tunnels within the “Tauern Window of the Central Alps” was evaluated with respect to potential risks to the existing springs. As part of the study, the geological setting of the catchment areas (gneiss or carbon mica-schists) in which the infiltration takes place was investigated. Hydrochemical modelling and analysis of calcite saturation indices and CO₂ partial pressures enabled differentiation between five groups of springs: (1) Those stemming from infiltration influenced by biological processes within the topsoil layer in addition to significant influence of carbonaceous mica-schists; (2) Springs from infiltration areas with only a limited top soil layer but with significant influence of carbonaceous mica-schists and possibly gneiss; (3) Springs that infiltrated under the influence of biological processes within the topsoil layer, but with no significant influence of carbonaceous mica-schists; (4) Springs that infiltrated with only a minor influence of top soil layers, without influence of carbonaceous mica-schists, but with possible influence of gneiss; (5) Springs from infiltration areas with neither influence of the top soil layer nor influence of any connected aquifer.

Results showed that the applied methods were appropriate for qualitative differentiation of infiltration areas in mountain ranges with distinct morphology and diverse vegetation. The approach has therefore helped to estimate potential environmental risks.

Mag. Dr. S. Hilberg (✉)
Fachbereich Geographie und Geologie, Universität Salzburg,
Hellbrunner Str. 34, 5020 Salzburg, Österreich
E-Mail: sylke.hilberg@sbg.ac.at

Keywords Groundwater springs · Hydrochemical modelling · Catchment areas · CO₂-partial pressure · Soil influence

Einleitung

In Gebirgsräumen mit ausgeprägtem topographischem Relief stellt sich sowohl bei der Erschließung von Wasserversorgungen als auch im Zuge der Errichtung verschiedenster technischer Anlagen in möglichen Quelleinzugsgebieten (z. B. Seilbahnanlagen, Schipisten, Straßen, Kraftwerksbauten) die Frage nach der hydrogeologischen Abgrenzung dieser Einzugsgebiete bzw. nach der Lage der Infiltrationsgebiete. Nur in Kenntnis der Infiltrationsgebiete kann ein ausreichender Schutz von Qualität und Quantität der Quellwässer gewährleistet werden. Sowohl in Karstgebirgen, häufig jedoch auch in nicht verkarsteten Kluftgrundwasserkörpern stimmen orographisches Einzugsgebiet und hydrogeologisches Einzugsgebiet nicht überein (ÖWWV-Regelblatt 205 1990). Dies vor allem auch dann, wenn innerhalb des orographischen Einzugsgebiets bedeutende strukturgeologische Elemente zu einer hydraulischen Trennung zwischen einzelnen Gebirgseinheiten führen können. Derartige hydraulisch wirksame Strukturen ergeben sich z. B. in der Umrahmung des ostalpinen Tauernfensters am Übergang zwischen Zentralgneiskern und der Tauernschieferhülle und zeigen sich durch Quellhorizonte, die entlang dieser Deckengrenze verlaufen. Ein solcher Quellhorizont wird z. B. auch für die Linie Mühldorf – Göriach – Trebesing – Maltaberg in Oberkärnten entlang der südöstlichen Umrahmung des Tauernfensters beschrieben (Hobiger & Kollmann 2006).

Die Bestimmung mittlerer Einzugsgebietshöhen mithilfe von stabilen Umweltisotopen ist grundsätzlich eine gut geeignete und etablierte Methode zur Abgrenzung von Einzugsgebieten in Gelände mit ausgeprägtem Relief (z. B. Clark & Fritz 1999, Moser & Rauert 1980). Auch die Untersuchung hydrochemischer Daten an Quellwässern wird angewendet um die Dynamik von Grundwasserkörpern zu beschreiben (Stichler & Zojer 1986). Grundvoraussetzung für gesicherte Aussagen zu Einzugsgebieten ist dabei, wie bei vielen hydrogeologischen Fragestellungen, ein ausreichend großer Datensatz, der neben Hydrochemie- und Isotopenzeitreihen sowie Schüttungsganglinien der jeweiligen Quelle auch Niederschlagsdaten aus dem entsprechenden Einzugsgebiet erfordert. Um jahreszeitlich bedingte Variationen im Verhältnis der stabilen Isotope $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ und Deuterium/Wasserstoff, der chemischen Zusammensetzung der Quellwässer sowie der Schüttungsmengen interpretieren zu können, müssen zeitlich hoch aufgelöste Daten aus mindestens einem Jahresgang vorliegen und diese zudem mit den meteorologischen Verhältnissen in Beziehung gesetzt werden.

Neben dem erforderlichen Zeitaufwand bis zur Vorlage einer ausreichend langen Zeitreihe stehen die im Gebirge häufig schwer und aufgrund von Lawinengefährdung nicht regelmäßig erreichbaren Probennahmestellen oft im Widerspruch zum Projektzeitplan. Die zur Abgrenzung von

Einzugsgebieten erforderlichen Datensätze liegen damit für die Hauptphase der Projektbearbeitung oft nicht vor. Dieser Umstand führt entweder zu Verzögerungen im weiteren Projektlauf oder zu einer Beurteilung, die auf unzureichenden Datensätzen beruht.

Aus einer derartigen Situation heraus erfolgte die Anwendung der nachfolgend beschriebenen Methode zur Abschätzung der Lage von Quelleinzugsgebieten mithilfe der hydrochemischen Modellierung. Sie ermöglichte es im beschriebenen Fall auf Basis einer einzigen hydrochemischen Beprobung aller betroffenen Quellaustritte fachlich für die Behörde nachvollziehbare Aussagen über die Einzugsgebiete treffen zu können und damit die potenzielle Beeinträchtigung durch ein geplantes Stollenbauwerk zu beurteilen.

Die hier angewandte Methode, mithilfe der Berechnung von Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichten Infiltrationsgebiete zu bestimmen, wurde zum Beispiel in einem bereits mit anderen Methoden gut untersuchten Karstaquifer in der Steiermark eingesetzt (Harum et al. 1992, Benischke et al. 1996). Dabei wurden hydrochemische Daten eines Jahresganges 14-tägig entnommener Wasserproben herangezogen. Es konnte gezeigt werden, dass der CO₂-Partialdruck in Kombination mit der Kalzitsättigung von Quellwässern in direktem Zusammenhang mit den Vegetations- und Bodenverhältnissen im jeweiligen Infiltrationsgebiet steht.

Die Grundlagen zur Beaufschlagung von Grundwässern mit CO₂ während der Infiltration wurden dazu durch Atkinson (1977) beschrieben. Neben einer jahreszeitlich schwankenden, da stark Temperatur abhängigen, CO₂-Beaufschlagung innerhalb der belebten Bodenzone, führt dieser eine zusätzliche jahreszeitlich wesentlich weniger variable Beaufschlagung auf Zersetzungsprozesse organischen Materials innerhalb der ungesättigten Zone zurück.

Das CO₂-Dargebot in der belebten Bodenzone und der ungesättigten Zone wird von den infiltrierenden Wässern gelöst und wirkt wiederum an Lösungsvorgängen im Grundwasserkörper entsprechend den Gesetzmäßigkeiten des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts mit (Plummer et al. 1978). Die an Quellaustritten gemessenen CO₂-Partialdrücke der Wässer spiegeln damit die Infiltrationsbedingungen wider und können zur Bestimmung von Infiltrationsgebieten herangezogen werden.

Die vorliegende Arbeit soll zeigen, dass auch in nicht verkarsteten Kluftgrundwasserkörpern sowie mit relativ wenigen verfügbaren Daten mithilfe hydrochemischer Berechnungen gute Hinweise zur Abschätzung von Infiltrationshöhen gewonnen werden können.

Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

Geologie

Das Reißbeckgebiet bildet die südöstliche Begrenzung des Tauernfensters, welches sich als Penninisches Deckensys-

tem über eine Länge von ca. 120 km bei einer Breite zwischen 40 und 60 km zwischen Brenner und Katschberg in den österreichischen Bundesländern Tirol, Salzburg und Kärnten erstreckt (Thiele 1980). Die Lage des Projektgebietes ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der östliche Abschnitt des Tauernfensters ist geprägt durch großflächig auftretende Gesteine der Zentralgneisformation, die das tiefste Deckenstockwerk des Penninikums im Tauernfenster aufbauen. Es handelt sich dabei um alpidisch metamorph überprägte granitische Gesteine variiender Ausprägung.

Gesteine der Bündner Schieferformation, im Untersuchungsgebiet vornehmlich vertreten durch Phyllite, Kalkglimmerschiefer und Prasinit, treten im Reißeckgebiet nur untergeordnet als Umrahmung der Zentralgneismasse im südöstlichen Anschluss an die Gneise auf und bauen den Nordhang des Mölltales im Untersuchungsgebiet auf (Pestal et al. 2006, Schuster et al. 2006).

Im Gebiet von Maltatal und der Reißeckgruppe tritt außerdem das Altkristallin des Reißeckkomplexes auf, das hier als Amphibolite und Bändergneise ausgebildet ist und als untere Schieferhülle bezeichnet wird (Clar & Demmer 1979). Diese Einheit baut im Untersuchungsgebiet z. B. den Gipfelbereich des 2.965 m hohen Reißeck auf.

Als wesentliches regionalgeologisch bedeutendes tektonisches Element ist die Deckengrenze zwischen den subpenninischen Zentralgneisen und den penninischen Bündner Schiefern zu nennen. Diese Grenze verläuft im Projektraum parallel zur Drau-Mölltal-Störung in NW-SE-Richtung am NE-Hang des unteren Mölltales und setzt sich in dieser Linie bis ins Sonnblickgebiet fort. Es handelt sich dabei um eine Zone parallel verlaufender Abschiebungen, entlang derer sich die unterlagernden Decken des Zentralgneiskerns herausgehoben haben. Entlang der Deckengrenzen zeichnet sich der Zentralgneis durch steiles Einfallen nach S aus, während die südlich folgenden Bündnerschiefer im Grenzbereich eine Überkippung aufweisen, deren Ursache in rezenten Hebungstendenzen des Zentralgneiskerns zu finden ist (Horninger 1960). Die geologische Situation im Projektgebiet ist in Abbildung 1 dargestellt.

Hydrogeologie

Generell wurden im Zuge der Projektbearbeitung im betrachteten Gebiet des südöstlichsten Tauernfensters drei hydrogeologisch unterschiedliche Grundwasserkörper unterschieden. Neben den beiden im Folgenden näher beschriebenen Kluftgrundwasserkörpern sind dazu die meist gering mächtigen quartären Hangschuttablagerungen zu nennen, die flächig auftreten und als seichte Porengrundwasserkörper klassifiziert werden können, in denen ein kurzfristiger Zwischenabfluss oberhalb der Festgesteinsslinie des Gebirges zum Vorfluter erfolgt. Die beiden Kluftgrundwasserkörper liegen in Zentralgneis und Schieferhülle und können

aufgrund unterschiedlicher tektonischer Belastung, unterschiedlicher Kompetenz und damit unterschiedlicher Kluftweiten stark variieren (Baumhackl 1960).

Innerhalb der Zentralgneismasse erfolgt die Wasserführung in Klüften verschiedener Öffnungsweiten über die auch die Infiltration der Niederschlagswässer ins Gebirge erfolgt. Die Wegigkeiten innerhalb des stark anisotropen Grundwasserkörpers sind damit abhängig von der Ausprägung der jeweiligen Kluftsysteme und damit von der tektonischen Beanspruchung des jeweils betrachteten Gebietes (Hobiger & Kollmann 2006). Je nach Ausprägung der Kluftsysteme können hier große Wassermengen transportiert werden. Die Entwässerung des Gebirges kann über wenige stark schüttende Quellen mit großen Einzugsgebieten ebenso erfolgen, wie über zahlreiche flächig verteilte kleine Quellaustritte. Quellhorizonte können dabei an tektonische Grenzen oder an Schichtwechsel gebunden sein. Ein Beispiel für eine große Quelle, die an den tektonischen Übergang zwischen Zentralgneis und Schieferhülle gebunden ist, findet sich in der Klinzer Schlucht bei Mühldorf (QU_SB_KOLB in Abb. 1). Hobiger & Kollmann (2006) beschreiben weitere große Kluftquellen auf einer Linie Mühldorf – Trebsing – Maltaberg, die im Wesentlichen der Deckengrenze zwischen Schieferhülle und Zentralgneismasse folgt. Die Verweilzeit der Quellwässer kann je nach Kluftweite und Kluftdichte stark variieren.

Die Wasserführung innerhalb von Gesteinen der Schieferhülle findet im Wesentlichen entlang von Schicht- und Schieferungsflächen und nur untergeordnet innerhalb offener Klüfte statt (Hölting & Coldewey 2009). Aufgrund der sehr feinkörnigen Gesteine, die im Vergleich zum Gneis duktil auf tektonische Beanspruchung reagieren, werden Klufthohlräume hier wieder verschlossen bevor sie dauerhaft hydraulisch wirksam werden können und stehen damit für die Wasserführung nicht zur Verfügung. Eine Infiltration von Niederschlagswässern findet nur untergeordnet statt, sodass innerhalb von Gesteinen der Schieferhülle generell mit deutlich geringerer Wasserführung zu rechnen ist. Es ist meist mit kleinen Einzugsgebieten und flächig mehr oder weniger regelmäßig verteilten kleineren Quellaustritten (bis ca. $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) zu rechnen. Quellhorizonte richten sich dabei nach Schicht- und Schieferungsflächen aus und sind häufig an Schichtwechsel gebunden. Es ist zu erwarten, dass die Verweilzeiten der Wässer innerhalb des Aquifers hier im Vergleich zu jenen im Gneis generell länger sind.

Die Deckengrenze zwischen den beiden Kluftaquiferen kann entweder entlang aufgelockerter Zonen Wasserwegigkeit und damit Übergänge ermöglichen oder aufgrund der starken tektonischen Beanspruchung zu einer Abdichtung und damit gänzlichen Trennung der beiden Grundwasserkörper führen. Für eine generelle hydraulische Trennung der beiden Kluftgrundwasserkörper spricht die oben beschriebene Quelllinie (Hobiger & Kollmann 2006). Im Zuge unveröffentlichter Untersuchungen am bestehenden westlich

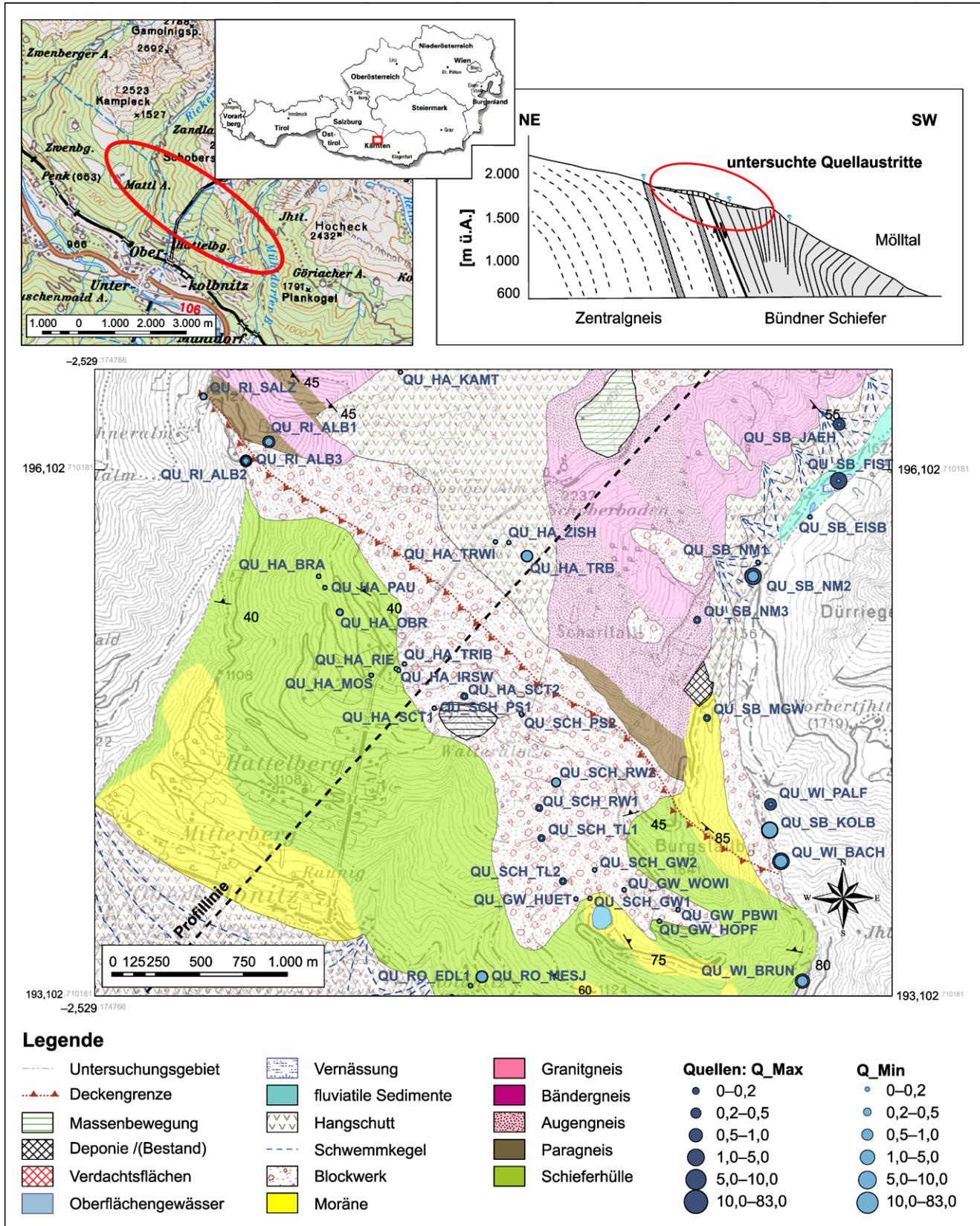


Abb. 1 Lage des Projektgebietes (nach BEV AMAP-Fly – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, 2005) und geologische Situation im Bereich der Deckengrenze in geologischer Karte und Pro-

filschnitt, Lage der untersuchten Quellaustritte mit minimaler und maximaler Quellschüttung

benachbarten Zwenbergstollen, der parallel zur Schieferung in NW-SE-Richtung entlang der Deckengrenze von Schieferhülle und Zentralgneis verläuft, werden starke Wasserzutritte in den Stollen sowie eine insgesamt strukturell bedingte starke Wasserführung im Übergangsbereich beider Decken beschrieben. Unter Berücksichtigung des gegenläufig ausgerichteten Einfallens von Schieferhülle und Zentralgneis aufgrund einer anhaltenden Überkipfungstendenz der Schieferhüllengesteine (Horninger 1960) (siehe Abb. 1, Profilschnitt) und der daraus resultierenden Zerrungszone erscheint eine derartige Öffnung verbunden mit verstärkter Wasserführung im Bereich der Deckengrenze grundsätzlich plausibel. Es ist daher davon auszugehen, dass zumindest einige Quellen, die orographisch unterhalb der Deckengrenze in Bündner Schiefern austreten, auf ein Infiltrationsgebiet in der Zentralgneiszone zurückführbar sind.

Ein wesentlicher Anteil der Niederschlagswässer, der nicht direkt als Oberflächenabfluss abgeführt wird, infiltriert lediglich in die quartären Ablagerungen, die flächig ausgebildet sowohl Zentralgneis als auch Schieferhülle in weiten Bereichen bedecken. Dieser meist geringmächtige Aquifer, der sich als Porengrundwasserkörper klassifizieren lässt, weist aufgrund der Grobkörnigkeit seiner Komponenten (Sand bis Blockwerk) und damit der hohen effektiven Porosität meist besonders gute Wasserwegigkeiten und geringes Retentionsvermögen auf. Der Abfluss der Wässer erfolgt hier im Allgemeinen auf der unterlagernden Felslinie. Quellaustritte, die große Schüttungsmengen und bedeutende Schüttungsquotienten aufweisen können, sind an das Ausbeissen der Felslinie unter der quartären Bedeckung oder an morphologische Gegebenheiten bzw. den Vorfluter geknüpft. Auf Basis der festgestellten Schüttungs- und Temperaturschwankungen sowie der guten Durchlässigkeit und des großen Gefälles ist davon auszugehen, dass die Verweilzeiten dieser Wässer vergleichsweise kurz (wenige Tage bis Monate) sind.

Moränen, die üblicherweise dicht gelagert sind und einen hohen Feinanteil aufweisen, wirken dagegen wasserspeichernd bzw. stauend.

Problemstellung

In der Gebirgsregion der Reißeckgruppe im Oberkärntner Mölltal war die Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerkes aus geologischer und hydrogeologischer Sicht auf seine Umweltverträglichkeit zu prüfen und zu dokumentieren. Ein Teil des Projektes ist die Ausführung eines unterirdischen Triebwasserweges, der auf einer Länge von ca. 7 km die Zentralgneiszone des Tauernfensters durchtönt, dabei den Kluftgrundwasserspiegel anschneidet und möglicherweise nachhaltig drainagiert. In diesem Zusammenhang war

zu klären ob und bei welchen Quellaustritten eine potentielle quantitative Gefährdung durch das Stollenbauwerk zu erwarten ist.

Dazu wurden folgende grundsätzliche Annahmen getroffen:

Quellen mit Infiltrationsgebieten, die sich in den Zentralgneis des Tauernfensters und damit über die Deckengrenze hinweg erstrecken, sind potenziell durch die Stollenerrichtung gefährdet, da deren Haupteinflussgebiet von den Auswirkungen einer Drainage betroffen sein kann. Quellen, deren Einflussgebiete sich ausschließlich auf die Schieferhülle beschränken, werden nicht beeinflusst, da diese unterhalb möglicher Drainagewirkungen liegen. Ebenso ist davon auszugehen, dass Quellaustritte, deren Einflussgebiet sich rein auf die überlagernde Lockergesteinsbedeckung beschränkt, von den Baumaßnahmen unbeeinträchtigt bleiben, da sie mit dem möglicherweise beeinträchtigten Kluftquifer im Zentralgneis in keiner hydraulischen Verbindung stehen bzw. maximal kleinräumig um die Austrittsbereiche von diesem gespeist werden.

Die untersuchten Quellaustritte liegen unterhalb des projektierten Stollens und treten aus der Lockergesteinsüberdeckung der Zentralgneise und der Bündner Schiefer aus. Die Lage der Quellen sowie die geologische Situation in den Quellgebieten sind in Abbildung 1 dargestellt.

Da die Deckengrenze zwischen den beiden Großeinheiten im gesamten Gebiet nicht aufgeschlossen ist, kann eine detaillierte Zuordnung der Quellaustritte zu einer der beiden Großeinheiten bzw. auch zur Lockergesteinsbedeckung auf Basis der geologisch-hydrogeologischen Geländeaufnahme nicht erfolgen. Zudem lassen sich Rückschlüsse auf das Infiltrationsgebiet nur sehr eingeschränkt aus dem Austrittsbereich treffen, da eine hydraulische Kommunikation zwischen beiden Kluftquiefen, wie oben dargelegt, nicht ausgeschlossen ist.

Beschreibung der Quellen

Im Zuge der Projektbearbeitung wurden die Quellschüttungen über ein Jahr monatlich erfasst, dabei wurden auch die chemisch-physikalischen Parameter *elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur* festgehalten. Des Weiteren fand im Zeitraum Ende Oktober bis Anfang November 2007 eine hydrochemische Beprobung aller Quellen zur Charakterisierung der Quellwässer statt. Dabei wurden die Hauptkationen Ca, Mg, Na, K sowie die Anionen Cl, SO₄, NO₃ und HCO₃ untersucht. Nebenbestandteile und Spurenstoffe wie Fe, Pb, Cd, Cr, As, B und Hg wurden ebenfalls analysiert. Die Gehalte lagen jedoch, von sehr wenigen Ausnahmen bei hier ebenfalls sehr geringen Werten abgesehen, unter der Nachweisgrenze und wurden daher in die weiteren Betrachtungen nicht einbezogen.

Tab. 1 Feldparameter der untersuchten Quellen, die Minimalen und Maximalwerte für Schüttung und Temperatur wurde den monatlichen Messungen aus dem Oktober 2007 bis Oktober 2008 entnommen

Bezeichnung	Koordinaten GK BM31			pH-Wert	Temperatur Min. [°C]	Temperatur Max. [°C]	Schüttung Min. [l · s ⁻¹]	Schüttung Max. [l · s ⁻¹]	Elektrische Leitfähigkeit [μS · cm ⁻¹]
	x	y	Seehöhe						
QU_RI_ALB1	-1538	196263	1.213	7,9	6,1	6,4	0,79	1,65	92
QU_RI_ALB2	-1668	196154	1.152	8,2	6,0	6,7	0,25	0,82	170
QU_RI_ALB3	-1668	196154	1.152	8	4,9	6,8	0,64	1,15	157
QU_HA_BRA	-1253	195497	1.500		4,2	5,4	0,08	0,08	220
QU_HA_IRSW	-811	194970	1.538	7,5	5,1	7,5	0,09	0,18	200
QU_HA_MOS	-953	194933	1.510	7,7	5,1	7,5	0,05	0,11	120
QU_HA_OBR	-1133	195292	1.500	7,8	3,7	6,3	0,23	0,32	130
QU_HA_PAU	-1218	195432	1.500	7,8	2,0	7,6	0,01	0,01	165
QU_HA_RIE	-797	194962	1.554	7,1	1,8	11,4	0,00	0,03	160
QU_HA_SCT1	-595	194745	1.482	7,6	4,7	6,8	0,03	0,13	200
QU_HA_SCT2	-424	194812	1.476	7,9	4,2	6,3	0,18	0,39	114
QU_HA_TRB	-66	195612	1.987	7	2,9	3,9	1,11	1,11	19
QU_HA_TRIB	-763	194996	1.569	6,7	1,3	11,0	0,00	0,02	70
QU_HA_TRWI	-246	195692	2.021	6,9	4,5	8,0	0,05	0,05	18
QU_HA_ZISH	-170	195689	2.014	6,7	2,6	9,3	0,02	0,02	13
QU_SB_FIST	1709	196042	1.654	7,1	4,3	7,2	0,00	82,90	30
QU_SB_JAEH	1712	196362	1.734	7,1	2,0	7,6	0,15	1,13	30
QU_SB_MGW	959	194689	1.501	7,1	1,8	6,7	0,00	0,33	110
QU_SB_NM1	1250	195576	1.605		6,3	6,3	0,00	0,09	38
QU_SB_NM2	1222	195497	1.589	7,1	4,9	5,8	1,20	17,80	35
QU_SB_NM3	904	195247	1.639	6,9	2,2	4,9	0,09	0,34	17
QU_SB_KOLB	1316	194049	1.276	7,6	5,4	6,5	11,22	22,83	50
QU_GW_HUET	292	193660	1.269	7,8	4,0	7,4	0,04	0,05	300
QU_GW_WOWI	487	193709	1.413		3,5	5,9	0,01	0,01	222
QU_GW_HOPF	688	193530	1.448		1,3	4,1	0,00	0,01	480
QU_SCH_TL1	17	194003	1.069	8,1	1,4	7,7	0,00	0,32	260
QU_SCH_TL2	139	193758	1.168	8,2	1,0	8,0	0,01	0,35	300
QU_SCH_GW1	213	193657	1.223	8	5,1	6,6	0,01	0,05	400
QU_SCH_RW1	3	194176	1.221	7,9	1,0	6,8	0,12	0,20	150
QU_SCH_RW2	100	194321	1.419	7,9	4,0	6,4	0,53	0,68	165
QU_SCH_PS1	-95	194707	1.468	6,8	2,1	6,7	0,01	0,04	27
QU_SCH_PS2	-99	194712	1.508	7,1	0,8	7,4	0,00	0,09	22
QU_WL_PALF	1321	194197	1.330	6,8	0,8	2,8	0,00	1,34	25
QU_WL_BACH	1381	193872	1.265	7,5	5,0	6,2	8,00	43,00	55
QU_RO_MESJ	-323	193212	9,46		12,2	12,2	1,42	1,42	480

Die Quellschüttungen schwanken in Bereichen zwischen weniger als $0,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ und über $80 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. In der Abbildung 1 sind die Quellen lagemäßig mit ihren Schwankungsbreiten im Beobachtungszeitraum dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Quellen, die aus der Blockschuttüberdeckung entlang der Deckengrenze austreten, mittlere Schüttungsmengen im Bereich zwischen 0,2 und $1,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ und relativ geringe Schwankungsbreiten aufweisen.

Die pH-Werte liegen generell im neutralen bis leicht basischen Bereich, wobei die Quellaustritte im Zentralgneis um

pH 7 jene in der Schieferhülle im Bereich bis ca. pH 8 liegen. Die Wassertemperaturen weisen unterschiedlich starke Schwankungen auf, liegen jedoch im Bereich der Schieferhülle generell entsprechend der niedrigeren Höhenlage um einige Grad höher als die Temperaturen von Quellwässern im Zentralgneisbereich. Stärkere Temperaturschwankungen im Jahresgang einzelner Quellen geben in beiden Abschnitten deutliche Hinweise auf den Einfluss von Oberflächenwässern mit kurzer Verweilzeit. Die Minimalwerte und die Maximalwerte der Feldparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

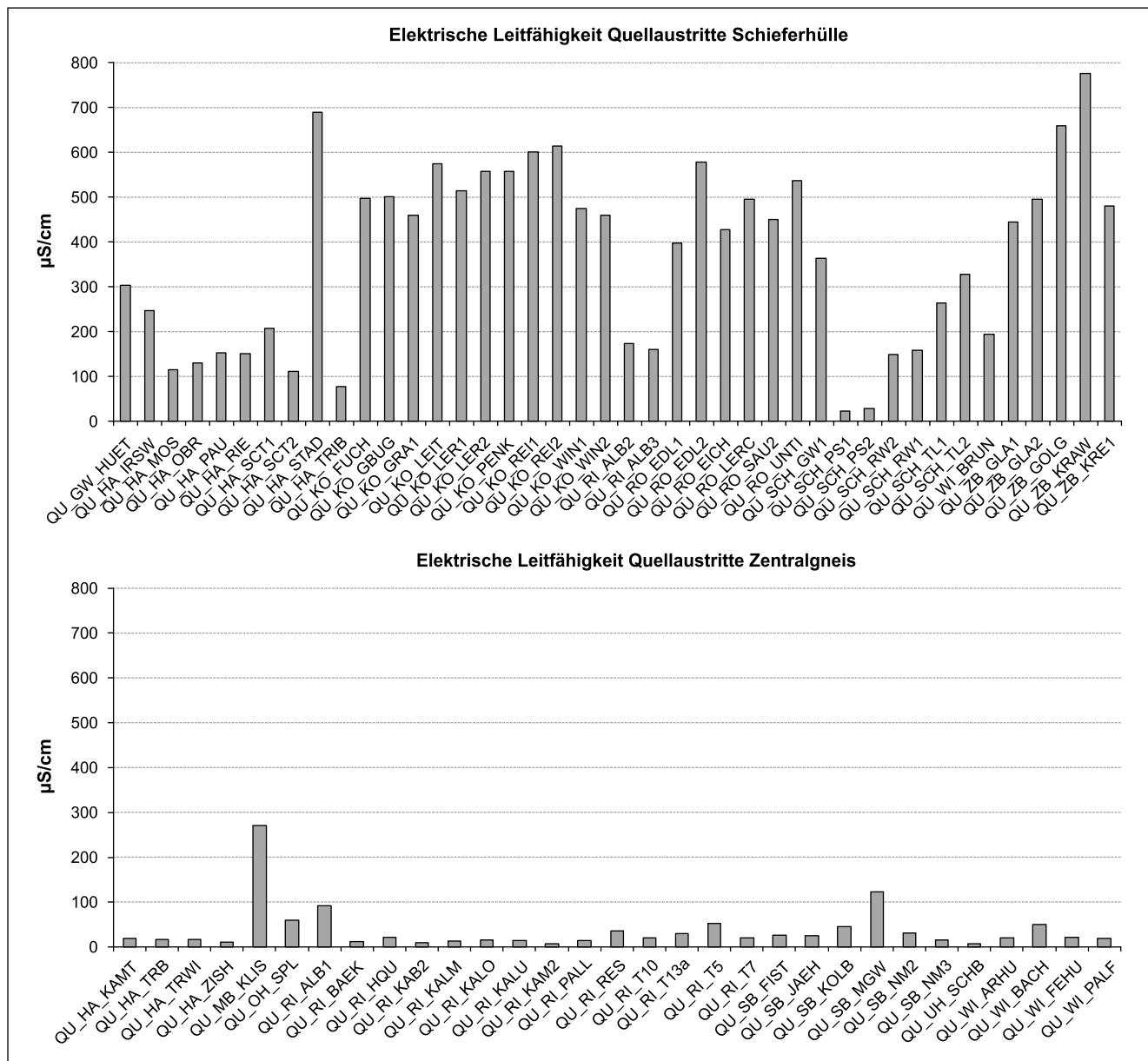


Abb. 2 Elektrische Leitfähigkeiten der Quellwässer, getrennt nach Austrittsbereichen in Schieferhülle (Kalkglimmerschiefer der Bündner Schieferzone) und Zentralgneiszone

In Abbildung 2 sind die elektrischen Leitfähigkeiten als Summenparameter der Mineralisation getrennt nach Quellaustritten in Schieferhülle und Zentralgneis dargestellt. Es zeigt sich, dass mit wenigen Ausnahmen die Quellaustritte unterhalb der Deckengrenze deutlich höher mineralisiert sind als Quellwässer, die oberhalb der Deckengrenze ausreten. Während die Wässer der Schieferhülle im Leitfähigkeitsbereich zwischen 200 und $600 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ liegen, weisen die Quellwässer im Zentralgneis generell Werte auf, die deutlich unter $100 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ liegen. Es zeigt sich bereits aus dem Vergleich der elektrischen Leitfähigkeiten, dass die Kluftgrundwässer im Zentralgneis nur geringe Beaufschla-

gung durch Lösungsvorgänge im Grundwasserkörper erfahren, während die Hydrochemie in der Schieferhülle starke Lösungsvorgänge anzeigt.

Auch die Betrachtung der Konzentrationen der wichtigsten Anionen und Kationen, wie sie in den Box-Whisker-Diagrammen in Abbildung 3 dargestellt sind, zeigt, dass die Wässer der Quellaustritte in der Schieferhülle um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher konzentriert sind als jene der Zentralgneiszone. Dabei weisen die im Kalkglimmerschiefer dominierenden Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen sowie der Gehalt an Hydrogenkarbonat die größten Unterschiede zu den Werten im Zentralgneis auf. Die Natrium-

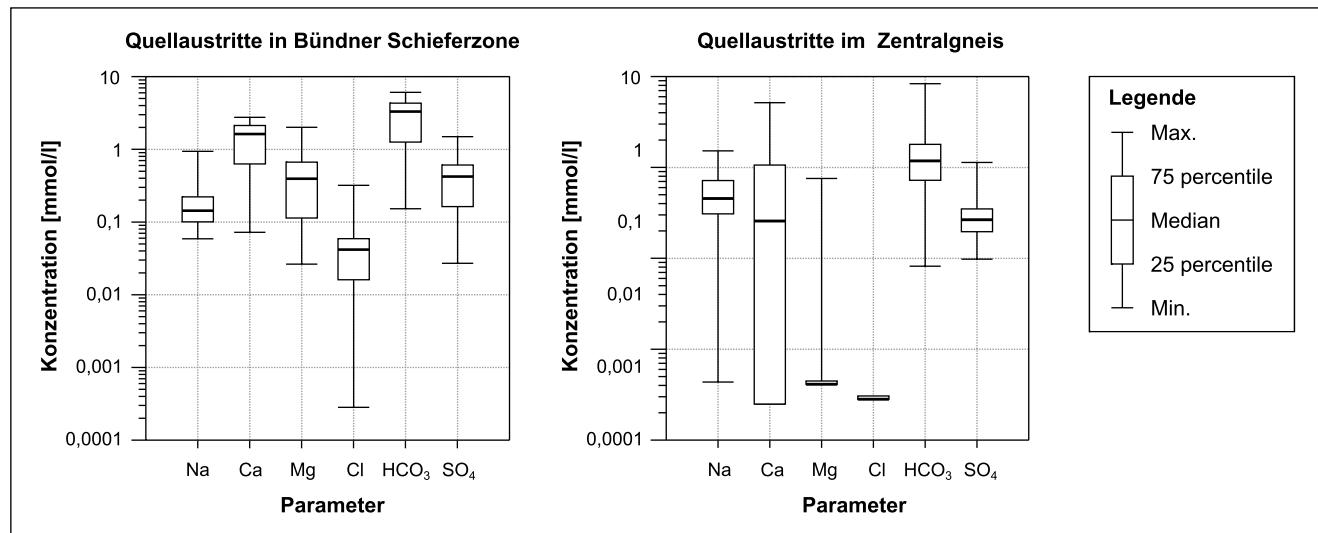


Abb. 3 Box-whisker-Diagramme zur Darstellung der Konzentrationen der Hauptelemente in beiden geologischen Großeinheiten

und Sulfatgehalte zeigen die vergleichsweise geringsten Unterschiede der beiden betrachteten Aquifere, dennoch ist auch hier eine eindeutige Anreicherung in den Schieferhüllenschwässern gegenüber den Zentralgneisquellen feststellbar.

Generell ergeben die Konzentrationsvergleiche wie auch die Ionenverhältnisse, dass die Betrachtung der Hauptionen in der gegenständlichen geologischen Situation nicht geeignet ist, um Quellaustritte der Schieferhülle auf ihr Einzugsgebiet hin zu beurteilen, da kein Leitparameter zur Verfügung steht, der den Wässern im Zentralgneis aufgeprägt wird und nicht beim Eintritt in die Schieferhülle von den hier stattfindenden Lösungsvorgängen überprägt wird.

Zur Lösung der erläuterten Problemstellung war es daher notwendig, einen Parameter zu identifizieren, der den Quellschwässern nicht im Aquifer sondern bereits im Zuge der Infiltration aufgeprägt wird, der sich zudem in den beiden geologischen Großeinheiten signifikant unterscheidet und der nicht beim Eintritt in die Schieferhülle durch hier stattfindende Lösungsvorgänge überprägt wird.

Anwendung des hydrochemischen Modellierungsprogramms PHREEQC

In der hydrogeochemischen Modellierung werden Wechselwirkungsprozesse in aquatischen Systemen auf Basis der Ionendissoziationstheorie beschrieben. Eines der dazu am häufigsten verwendeten Programme ist das Programm PHREEQC, Version 2 (Parkhurst & Appelo 1999). Diese Software kann frei über die Website des United States Geological Survey (USGS) bezogen werden.

Das Programm bietet die Möglichkeit, verschiedene hydrochemische Vorgänge in der aquatischen Lösung zu simulieren.

Das hydrochemische Modell in PHREEQC und dessen Anwendung wird z. B. in Merkel & Planer-Friedrich (2008) detailliert beschrieben. Einige anschauliche hydrogeologische Anwendungsbeispiele sind z. B. in Schubert (2008) dargestellt.

Für die hydrochemischen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Projekt Reißbeck waren vor allem die Größen *CO₂-Partialdruck* und *Sättigungsindex* für Kalzit von Bedeutung. (Die Erläuterungen hierzu ergeben sich aus dem folgenden Kapitel „Abschätzung der Höhenlage von Infiltrationsgebieten durch hydrochemische Modellrechnungen“.) Die Berechnung dieser Parameter ergibt sich aus den Anionen- und Kationenkonzentrationen der Wasseranalyse in Verbindung mit den bei der Probennahme gemessenen Parametern *pH-Wert* und *Temperatur*, die als Datensatz in das Inputfile einfließen.

Da es sich bei allen untersuchten Wässern um vergleichsweise gering mineralisierte Wässer handelt, konnte zur Berechnung die Ionendissoziationstheorie (Debye & Hückel 1923) herangezogen werden, die nur bis zu Ionenstärken bis max. $1 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ (oder sogar nur $0,7 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ – Meerwasserkonzentrationen) Gültigkeit hat, da bestimmte Annahmen, die gegenseitige Beeinflussung von Ionen innerhalb einer Lösung betreffend (Appelo & Postma 2005), in höher konzentrierten Lösungen nicht mehr zutreffen.

Abschätzung der Höhenlage der Infiltrationsgebiete durch hydrochemische Modellrechnungen

Zur vertieften Auswertung der hydrochemischen Untersuchungen mit dem Ziel einer überschlägigen Abgrenzung des jeweiligen Quelleinzugsgebietes wurden mit den vorliegenden Daten hydrochemische Modellrechnungen durchgeführt

und die Sättigungsindizes für die Phase Kalzit sowie die Gehalte an gelöstem Kohlendioxid (CO_2 -Partialdruck) untersucht und zueinander in Beziehung gesetzt.

Die Theorie hinter diesem Ansatz basiert auf dem unterschiedlichen Dargebot an CO_2 in Abhängigkeit vom Aufbau der ungesättigten Bodenzone sowie dem jeweiligen Bewuchs und der Bioaktivität im Infiltrationsgebiet. Diese Faktoren ändern sich in Gebirgsregionen wesentlich mit der topographischen Höhe, sodass aus der Infiltration resultierende hydrochemische Signaturen zum Vergleich von Infiltrationsgebieten und damit den Höhenlagen von Einzugsgebieten herangezogen werden können.

Der CO_2 -Partialdruck ($\log P_{(\text{CO}_2)}$) wird in logarithmischer Darstellung angegeben und beträgt in Wässern, die mit der Atmosphäre im Gleichgewicht stehen, entsprechend der Atmosphärenkonzentration von ca. 0,03 Vol.-% CO_2 etwa -3,5 (Benischke et al. 1996). In der belebten Bodenzone wird CO_2 durch verschiedenste biogene Aktivitäten angereichert und kann bis zu zwei Zehnerpotenzen höher konzentriert vorliegen ($\log P_{(\text{CO}_2)} -2,5$ bis -1,8) (Atkinson 1977).

Je mächtiger die durchwurzelte Bodenzone und je stärker die biologische Aktivität im Boden ist, umso mehr CO_2 wird freigesetzt. Neben einem Höheneffekt, dem unterschiedlich starke Bioaktivität in verschiedenen Höhenlagen zugrunde liegt, kommt auch ein saisonaler Effekt mit geringerem CO_2 -Dargebot im Winter und höheren CO_2 -Gehalten im Sommer zum tragen. Je nach Kornzusammensetzung und Wassersättigung und damit der Durchlässigkeit des Bodens für Gase kann der CO_2 -Partialdruck zusätzlich variieren, da hierüber der Austausch mit der Atmosphärenluft gesteuert wird.

Eine weitere CO_2 -Beaufschlagung innerhalb der tiefen ungesättigten Zone kann durch die Zersetzung von organischem Material, das mit den Sickerwässern in die Tiefe transportiert wurde, erfolgen (Atkinson 1977). Dieser Prozess ist im Gegensatz zur Beaufschlagung in der belebten Bodenzone nur bedingt jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, da hier nur geringe Temperaturschwankungen wirksam werden. Die jahreszeitlichen Schwankungen, die sich beim Durchlaufen der belebten Bodenzone ergeben, werden durch diesen zweiten Prozess wesentlich abgedämpft. Atkinson (1977) erklärt mit diesem Ansatz zum einen die deutlich über den erwarteten Werten gemessenen Partialdrücke sowie die festgestellten relativ geringen Schwankungen im Jahresgang der von ihm untersuchten Quellwässer.

Im hier beschriebenen Fall wurde anders als in den oben zitierten Arbeiten kein kurzfristig entwässernder Karstgrundwasserkörper untersucht, sondern der Übergangsreich zwischen zwei unterschiedlichen Kluftgrundwasserkörpern mit erfahrungsgemäß deutlich höheren Verweilzeiten, woraus eine weitere Dämpfung jahreszeitlich bedingter Schwankungen der CO_2 -Partialdrücke zu erwarten ist.

Die Beprobung fand im Herbst 2007 (Ende Oktober, Anfang November) statt, also in einer Phase bereits eingeschränkter biologischer Aktivitäten. Es ist zu erwarten, dass eine zweite Beprobung in Zeiten intensiverer biologischer Aktivitäten zu entsprechend deutlicheren Unterschieden der CO_2 -Partialdrücke führt. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Dämpfungseffekte sowie im relativen Vergleich der untersuchten Wässer wird die Annahme getroffen, dass diese einmalige Beprobung in Hinblick auf die Fra gestellung als repräsentativ anzusehen ist.

Vom CO_2 -Gehalt der Lösung ist aufgrund der Gesetzmäßigkeiten des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes (Plummer & Busenberg 1982, Hobiger 1997, Appelo & Postma 2005) die Entwicklung der Karbonatlösung abhängig, d. h. die Sättigungskonzentration der Karbonate steigt mit zunehmendem CO_2 -Gehalt, sodass der Lösungsvorgang beim Durchfließen des Grundwasserleiters in Abhängigkeit vom Infiltrationsgebiet zu sehen ist. Der Gehalt an gelöstem Karbonat richtet sich zudem nach der Verfügbarkeit im Aquifer. Grundsätzlich steht im Trennflächensystem der Schieferhülle (wenige wasserwirksame Klüfte, Schieferungs- und Schichtflächen) naturgemäß deutlich mehr Karbonat zur Lösung zur Verfügung als dies im Zentralgneis der Fall ist. Wässer, die nur im Zentralgneis zirkulieren, müssen daher bei vergleichbaren CO_2 -Partialdrücken eine geringere Kalzit-Sättigung aufweisen.

In Abbildung 4 sind die Kalzitsättigungsindizes gegen die CO_2 -Partialdrücke der verfügbaren Wasseranalysen in Form eines Scatter-Diagramms aufgetragen. Dazu wurde eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Quellaustritten im Bereich von Zentralgneis und Schieferhülle berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass eine Gruppierung der Quellwässer nach ihrem Verhältnis von Kalzitsättigung zu CO_2 -Partialdruck möglich ist und dass sich deutliche Unterschiede zwischen Zentralgneis- und Schieferhüllnwässern ergeben. Es lassen sich hier insgesamt die folgenden fünf Gruppen herausarbeiten:

1. Gegenüber der Atmosphäre deutlich erhöhte CO_2 -Partialdrücke deuten auf eine Infiltration unter Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone hin. Das Infiltrationsgebiet muss daher topographisch unter der Hochgebirgszone liegen, in welcher nur geringe Beaufschlagung während der Infiltration erfolgt. Die leichte Übersättigung an Kalzit lässt auf eine Zirkulation der Wässer innerhalb von Kalkglimmerschiefern der Schieferhülle schließen. Da das Infiltrationsgebiet damit eindeutig unterhalb der Deckengrenze (ca. 1.600 m ü.A.) zum Zentralgneis liegt und diese Grenze als hydraulische Grenzfläche zwischen den beiden Aquiferen anzusehen ist, kann eine Beeinflussung durch die geplanten Stollenbauwerke, die in einer Höhe zwischen 2.300 und 1.800 m ü.A. innerhalb der Zentralgneiszone liegen, ausgeschlossen werden.

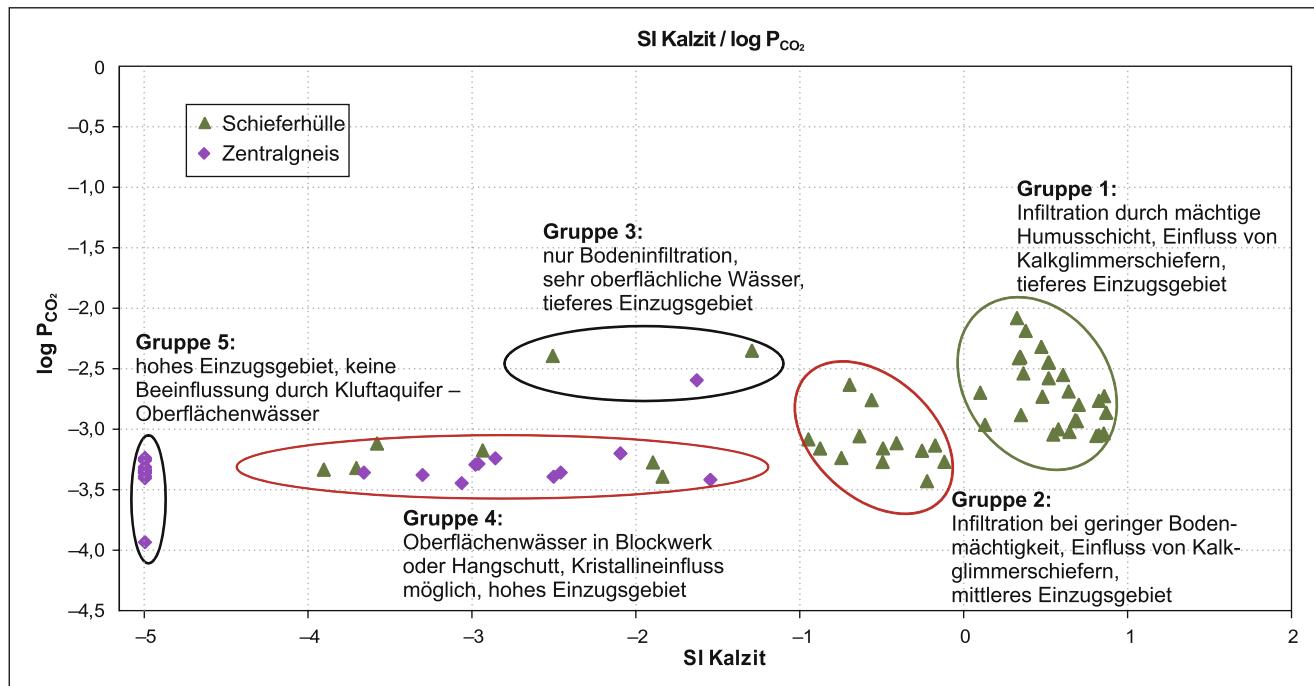


Abb. 4 Gruppierung der Wässer nach Kalzitsättigungsindex und CO₂-Partialdruck. Die rot umhüllten Gruppen sind aufgrund ihres Einzugsgebiets durch das Stollenprojekt als potenziell gefährdet zu bewerten

2. Gering erhöhte bzw. dem Atmosphärengehalt entsprechende CO₂-Partialdrücke weisen auf eine Infiltration unter geringer Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone und damit auf im Vergleich zur Gruppe 1 orographisch höhere Infiltrationsgebiete hin. Die leichte Untersättigung der Wässer an Kalzit zeigt, dass diese nicht oder nicht ausreichend lange innerhalb der Bündner Schiefer zirkulieren um ein Sättigungsgleichgewicht bezüglich der Phase Kalzit zu erreichen. Das Einzugsgebiet der Quellen dieser Gruppe ist damit im Übergangsbereich zwischen den beiden Großeinheiten, also im Bereich der Deckengrenze anzusiedeln. Für diese Quellen, die zwar in der Schieferhülle austreten aber zumindest teilweise aus dem Zentralgneis gespeist werden, besteht die Gefahr einer quantitativen Beeinträchtigung durch die geplanten Stollenbauwerke.
3. Gegenüber der Atmosphäre erhöhte CO₂-Partialdrücke weisen für diese Wässer ein vergleichsweise tiefes Infiltrationsgebiet aus, da die Infiltration unter Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone erfolgt ist. Die Wässer zeigen jedoch eine deutliche Untersättigung der Phase Kalzit, was darauf hindeutet, dass keine Wasserzirkulation innerhalb der Kalkglimmerschiefer stattgefunden hat. Es handelt sich demnach um Wässer, die in tieferen Hangbereichen ausschließlich und vermutlich mit kurzer Verweilzeit innerhalb der Hangschuttbedeckung zirkulieren. Diese Quellen können daher eindeutig als Schuttquellen identifiziert werden. Da die Quellen nicht

mit dem Kluftgrundwasserkörper der Zentralgneiszone in Kontakt stehen, kann eine Gefährdung durch die Baumaßnahmen ausgeschlossen werden.

4. Der CO₂-Gehalt dieser Wässer entspricht im Wesentlichen jenem der Atmosphäre, was zeigt, dass die Infiltration ohne Beaufschlagung durch die belebte Bodenzone erfolgt ist und damit auf ein orographisch hoch gelegenes Einzugsgebiet hindeutet. Die Wässer weisen zudem deutliche Untersättigung an Kalzit auf, sind also vom Kluftquifer der Bündner Schieferzone unbeeinflusst. Das Einzugsgebiet dieser Wässer erstreckt sich demnach ausschließlich auf den Zentralgneis bzw. auf die Hangschuttbedeckung in der Zentralgneiszone. Damit stehen die Quellen möglicherweise mit dem durch Stollenbauten beeinflussten Aquifer in Verbindung und sind daher als potenziell gefährdet zu bewerten.
5. Die Wässer weisen der Atmosphäre entsprechende CO₂-Partialdrücke bei deutlicher Untersättigung an Kalzit auf. Sie sind damit weder durch eine belebte Bodenzone noch durch Lösungsvorgänge aller Art innerhalb eines Kluftgrundwasserkörpers beeinflusst. Es handelt sich hierbei um sehr kurzfristig im Hangschutt abfließende Niederschlagswässer, deren Zirkulation durch die zu bewertenden Baumaßnahmen in keiner Weise beeinflusst wird.

Die räumliche Verteilung der nun jeweils einer Gruppe zugeordneten Quellaustritte ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Beurteilung des Gefährdungspotenzials, welches sich aus der Auswertung der hydrochemischen Modellierung ergab,

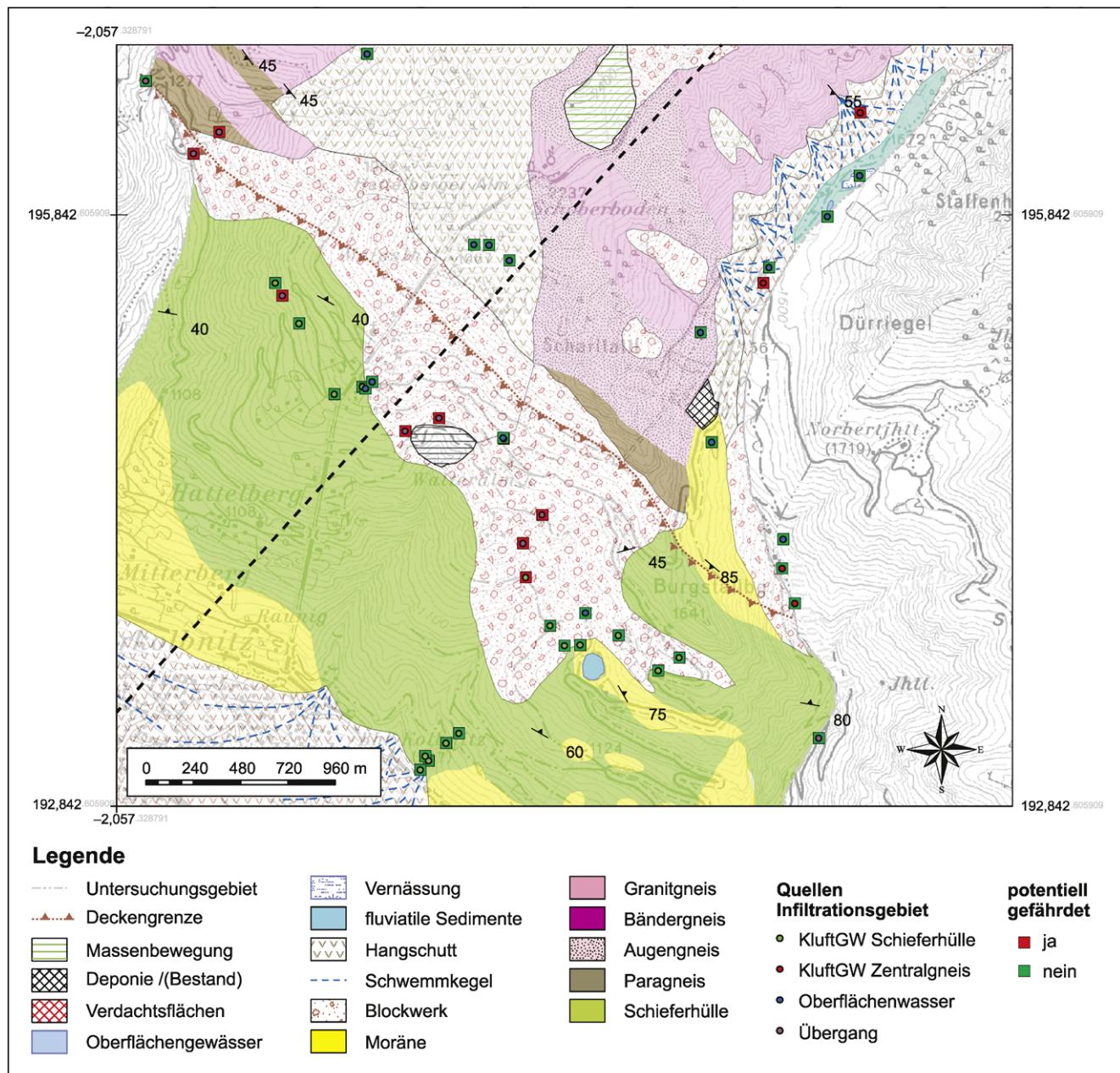


Abb. 5 Zuordnung der Quellen gemäß hydrochemischer Klassifizierung, Beurteilung des Gefährdungspotenzials durch die geplanten Baumaßnahmen

geht ebenfalls aus Abbildung 5 hervor. Eine Beeinträchtigung kann danach für jene Quellen nicht ausgeschlossen werden, die den Gruppen 2 oder 4 zugeordnet wurden.

Schlussfolgerung und Ausblick

Anhand dieses Fallbeispiels zeigen wir eine Möglichkeit zur schnellen überschlägigen Abschätzung von Einzugsgebietshöhen durch die computergestützte Auswertung vorhande-

ner hydrochemischer Daten und stellen diese zur Diskussion.

Während hydrogeologische Interpretationen auf Basis von quantitativen und qualitativen Feldparametern, von hydrochemischen Konzentrationsvergleichen oder auch von Isotopenanalysen grundsätzlich erst unter Berücksichtigung von Zeitreihen eine gesicherte Charakterisierung von Einzugsgebieten und Infiltrationshöhen ermöglichen, bietet die Betrachtung von Kalzitsättigung und CO₂-Partialdrucken die Möglichkeit, Infiltrationsbedingungen anhand weniger kurzfristig verfügbarer Daten zu rekonstruieren und damit

Hinweise auf die Höhenlage der jeweiligen Infiltrationsgebiete zu erlangen.

Die Methode kann nicht zur absoluten Bestimmung von Einzugsgebietshöhen dienen, sie ermöglicht jedoch den relativen Vergleich von Einzugsgebieten und kann somit, wie im Fallbeispiel gezeigt, zur Bewertung von Gefährdungspotenzialen beitragen. Voraussetzung ist ein Gebiet mit ausgeprägter Morphologie und entsprechend variierenden Vegetationszonen.

Das Beispiel zeigt, dass die selten detailliert ausgewerteten hydrochemischen Daten, die im Zuge von Projektplanungen gesammelt und oft nur als Beweissicherungsdaten „auf Halde“ gelegt werden, einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis hydrogeologischer Zusammenhänge liefern können, sobald eine computergestützte Detailbearbeitung der Daten auf Basis hydrochemischer Modellansätze durchgeführt wird.

Zur Überprüfung der allgemeinen Anwendbarkeit dieser von uns bisher nur im Projektgebiet Reißeck in Oberkärnten angewandten Methode ist die beispielhafte Anwendung in weiteren geologisch-hydrogeologisch unterschiedlichen Testgebieten und eine Verifizierung der Ergebnisse über entsprechende Isotopenuntersuchungen geplant. Dabei sollen auch die jahreszeitlichen Schwankungen der untersuchten Parameter erfasst und interpretiert werden. Ein möglicher Dämpfungseffekt, wie er auch bei der Interpretation stabiler Isotope zur Ersteinschätzung von Verweilzeiten herangezogen wird, kann sich auch für die CO₂-Partialdrucke ergeben. Auch dieser Fragestellung soll im Rahmen vertiefender Untersuchungen nachgegangen werden.

Die Untersuchung von Sickerwässern in verschiedenen topographischen Höhenlagen bzw. den innerhalb des seichten Porengrundwasserkörpers zirkulierenden Wässern unter Einbeziehung botanischer Erhebungen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten erscheint in Hinblick auf die wesentliche Rolle der biologischen Aktivitäten in der ungesättigten Bodenzone ebenfalls als zukünftiger wichtiger Input zur systematischen Überprüfung der vorgestellten Methode.

Danksagung Die Autorin dankt der Verbund Austrian Hydro-power AG (AHP), insbesondere Herrn Dipl. Ing. Anton Kogler für die Erlaubnis zur wissenschaftlichen Verwertung der geologisch-hydrogeologischen Ergebnisse sowie der hydrochemischen Daten des Projektes Pumpspeicherkraftwerk Reißeck II.

Ein weiterer Dank gilt Prof. Dr. Johannes Barth, Dr. Peter Schulte sowie einem weiteren anonymen Gutachter für die ausgesprochen konstruktive Kritik und die anregenden Vorschläge zur Verbesserung dieser Arbeit.

Literatur

- Appelo, C.A.J., Postma, D.: Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2nd edn., S. 649. A.A. Balkema Publishers, Leiden (2005)
- Atkinson, T.C.: Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone; an important control of groundwater hardness in limestones. *J. Hydrol.* **35**, 111–123 (1977)
- Baumhackl, H.: Die Hydrologie des Winterspeicherwerkes Reißeck-Kreuzeck. *ÖZE* **13**(6), 255–259 (1960)
- Benischke, R., Harum, T., Leditzky, H.: Berechnung von Karbonat-Kohlensäure-Gleichgewichten: ein Hilfsmittel zur Charakterisierung der Hydrodynamik und Herkunft von Karstwässern. *Mitt. Österr. Geol. Ges.* **87**, 37–46 (1996)
- Clar, E., Demmer, W.: Die Geologie der Kraftwerksgruppe Malta. *ÖZE* **32**(1/2), 12–20 (1979)
- Clark, I., Fritz, P.: Environmental Isotopes in Hydrogeology, S. 328. Lewis Publishers, New York (1999)
- Debye, P., Hückel, E.: Zur Theorie der Elektrolyte. *Phys. Z.* **24**, 185–206 (1923)
- Harum, T., Zojer, H., Leditzky, R., Benischke, R., Stichler, W., Trimborn, P., Rank, D., Rainer, V.: Long-term investigations with natural tracers. In: Behrens, et al. (Hrsg.) Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach system (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, Bd. 43, S. 9–158 (1992)
- Hobiger, G.: Kohlensäure in Wasser – Theoretische Hintergründe zu den in der Wasseranalytik verwendeten Parametern, 2. ergänzte Aufl. BE-086a, S. 45. Umweltbundesamt, Wien (1997)
- Hobiger, G., Kollmann, W.H.: Hydrogeologie. In: Schuster, R., Pestal, G., Reitner, J. (Hrsg.) Erläuterungen zu Blatt 182 Spittal an der Drau, S. 115. Geologische Bundesanstalt, Wien (2006)
- Hölting, B., Coldewey, W.G.: Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 7. Aufl., S. 383. Spektrum akademischer Verlag, Heidelberg (2009)
- Horninger, G.: Baugeologisches aus der Kraftwerksgruppe Reißeck-Kreuzeck. *ÖZE* **13**(6), 260–264 (1960)
- Merkel, B., Planer-Friedrich, B.: Grundwasserchemie – Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, 2. Aufl., S. 242. Springer, Berlin/Heidelberg (2008)
- Moser, H., Rauert, W.: Isotopenmethoden in der Hydrogeologie, Bd. 8, S. 400. Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart (1980)
- ÖWWV – Österreichischer Wasserwirtschaftsverband: ÖWWV-Regelblatt 205: Nutzung und Schutz von Quellen in nicht verkarsteten Bereichen, S. 92. Bohrman Druck und Verlag GmbH, Wien (1990)
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.: Users guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport, and invers geochemical calculations. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, p. 312 (1999)
- Pestal, G., Rataj, W., Reitner, J., Schuster, R.: Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, Blatt 182: Spittal an der Drau. Geologische Bundesanstalt, Wien (2006)
- Plummer, L.N., Busenberg, E.: The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90 °C, and an evaluation of aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta* **46**, 1011–1040 (1982)
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L.: The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5° to 60° and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *Am. J. Sci.* **278**, 179–216 (1978)
- Schubert, G.: PHREEQC, eine Freeware der USGS zur hydrochemischen Gleichgewichtsberechnung – Anwendungsbeispiele für Hydrogeologen. In: Computeranwendungen in Hydrologie, Hydrogeologie und Geologie. Beiträge zur COG-Fachtagung, Salzburg, 2007 (2008)
- Schuster, R., Pestal, G., Reitner, J.: Erläuterungen zu Blatt 182: Spittal an der Drau, S. 115. Geologische Bundesanstalt, Wien (2006)
- Stichler, W., Zojer, H.: Umweltisotopenmessungen und hydrochemische Untersuchungen als Hilfsmittel für die Erfassung von Quellinzugsgebieten. *Oesterr. Wasserwirtsch.* **38**, 261–266 (1986)
- Thiele, O.: Das Tauernfenster. In: Oberhauser, R. (Hrsg.) Der Geologische Aufbau Österreichs, S. 699. Springer, Wien/New York (1980)