

Hydrogeologie im Gipskarst als Basis geotechnischer Langzeitprognosen im Bergbau

Sylke Hilberg · Viktoria Armingner · Franz Riepler · Gunter Gschwandtner · Robert Galler

Eingang des Beitrages: 26.4.2013 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 9.10.2013 / Online veröffentlicht: 19.12.2013
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Zusammenfassung Die Hydrogeologie des „Haselgebirges“ ist im Zusammenhang mit Gipsbergwerken von praktischer Bedeutung. Kenntnis über den Grundwasserumsatz, Herkunft und Verweilzeit der Wässer und deren Hydrochemie bilden Grundlagen für die Beurteilung der Stand-sicherheit der oft oberflächennahen Grubengebäude. Neben kurzfristig über Karsthohlräume zu- und abfließenden Wässern eines lokalen Fließsystems bilden regional zirkulierende Wässer einen Teil des Gesamtabflusses. Während die lokalen Niederschlagswässer wegen ihres hohen Lösungspotenzials intensiv zur Verkarstung über dem Grubengebäude beitragen, weisen Wässer des regionalen Fließsystems bei ihrem Eintritt in das Grubengebäude Sättigung der im Gebirge vorhandenen Mineralphasen (Gips und Anhydrit) auf und sind für die Verkarstung wenig relevant.

Am Beispiel eines aufgelassenen Gipsbergbaues am Kalkalpennordrand wurde eine mengenmäßige Separation von niederschlagsabhängigem Abfluss des lokalen Fließsystems und Basisabfluss eines regionalen Fließsystems vorgenommen und dabei eine Verteilung von etwa 1:3 ermittelt. Während im lokalen Fließsystem ein Umsatz innerhalb

weniger Tage stattfindet, ergeben Schüttungsganglinien und Isotopenzeitreihen, dass ein wesentlicher Anteil der Wässer eine bedeutend längere Verweilzeit aufweisen muss. Die Verteilung zwischen lokalem und regionalem Fließsystem wurde mithilfe hydrochemischer Modellierungen verifiziert.

Hydrogeology in gypsum karst as base for geotechnical long term prognosis in mining plants

Abstract The hydrogeology of the “Haselgebirge” is of great significance in the context of gypsum mining. Knowledge of water balance, recharge areas and mean residence times, as well as hydrochemistry is crucial to assessing the long term stability of mines. Aside from a karstified local aquifer, a regional flow system can also contribute appreciable proportions to the total discharge. Groundwater from the local flow system with low mineralization is subsaturated, thus holding a high potential for karstification. Water from the regional system infiltrates the mine in a status of saturation with regard to gypsum and anhydrite. Hence, these waters have only negligible influences on karstification.

The presented example of a gypsum mine in Austria describes the quantitative proportions of local and regional flow which is in the range of 1:3. The results were verified by means of hydrochemical modeling.

Keywords Gypsum karst · Mining · Geotechnical stability · Hydrochemistry · Northern Calcareous Alps · Haselgebirge

Einleitung und Problemstellung

Im alpinen Raum liegen ausgedehnte Evaporitablagerungen vor. Sie bilden die Basis der Nördlichen Kalkalpen (Schau-

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

F. Riepler
GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH,
Bayerhamer Str. 57, 5020 Salzburg, Österreich
E-Mail: office@gwu.at

G. Gschwandtner · R. Galler
Lehrstuhl Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Str. 18, 8700 Leoben, Österreich

G. Gschwandtner
E-Mail: gunter.gschwandtner@unileoben.ac.at

berger 1986) und kommen daher verbreitet am Kalkalpen-nordrand vor. Aufgrund der Neigung von gips- und anhydrithaltigen Gesteinen zur plastischen Verformung bei hohen Verformungsraten (Leitner et al. 2013) weisen derartige Ablagerungen meist weder eine hydraulisch wirksame Matrixporosität noch bedeutende tektonisch bedingte Kluftporositäten auf. Zudem kann die Hydratation von Anhydrit und die Gipsfällung neben der plastischen Verformung zu einer sekundären Verringerung der Porosität führen (Kilchmann et al. 2004). Wegen der vergleichsweise guten Wasserlöslichkeit der Mineralphasen Gips und Anhydrit finden jedoch bei Wasserkontakt an der Geländeoberfläche bzw. in bestehenden Hohlräumen Lösungsprozesse statt, die wesentlich schneller ablaufen, als dies in Kalkkarstgebieten der Fall ist (Gutierrez et al. 2007). Künstlich angelegte Hohlräume, z. B. Stollen im Gipsbergbau, stellen sekundäre Wasserwege dar, die sich durch Lösungsprozesse eindringender Niederschlags- oder Grundwasser zu großen Lösungshohlräumen entwickeln können. Derartige anthropogene Eingriffe können Verkarstungsprozesse in Gang setzen, an deren Ende, je nach Überlagerungsmächtigkeit, Tagebrüche stehen können.

Neben geotechnischen Überlegungen ist zur Beurteilung der Stabilitätssituation auch eine detaillierte Kenntnis der hydrogeologischen und hydrochemischen Prozesse im Einzugsgebiet von Gipsbergwerken erforderlich.

Im hier präsentierten Fallbeispiel war die Frage der Langzeitstabilität eines aufgelassenen Gipsbergbaus im niederösterreichischen Hinterbrühl zu klären. Die umfangreichen geotechnischen Untersuchungen (Gschwandtner et al. 2013) wurden dabei durch eine Beurteilung der hydrogeologischen Situation ergänzt.

Grundwasserzirkulation erfolgt generell in verschiedenen räumlichen Skalen. Es kann sich dabei um lokale, regionale oder überregionale Fließsysteme handeln, die jeweils ineinander greifen können (Toth 1999). Quellen, wie auch Wasserzutritte in anthropogen geschaffenen unterirdischen Hohlräumen, enthalten daher meist Mischwässer aus verschiedenen Einzugsgebieten und Fließsystemen.

Im Gipsbergbau in Hinterbrühl konnten bei den Austrittswässern im Bergwerk sowohl sehr hohe Sulfat- als auch Hydrogenkarbonat-Gehalte festgestellt werden. Da im orographischen Einzugsgebiet der Grube fast ausschließlich Haselgebirge und damit Sulfatminerale anzutreffen sind, muss die Hydrogenkarbonatkonzentration aus quellferneren kalkalpinen Einheiten stammen. Als Arbeitshypothese zum Verständnis der hydrogeologischen Situation des Grubengebäudes wurden daher zwei Fließsysteme als Zubringer angenommen: (1) ein regionales Fließsystem, das einen unterirdischen Zufluss zum Grubengebäude bildet und das kalkalpine Einheiten berührt. In diesem Fließsystem erfahren die Wässer zunächst eine Kalksättigung, bevor sie im Einflussbereich des Haselgebirges mit Sulfaten angereichert werden. Das Grubengebäude erreichen diese Wässer bereits mit

Sättigungskonzentrationen. (2) Ein Teil der Wässer, die in das Grubengebäude eintreten, hat seinen Ursprung in einem lokalen Fließsystem im orographischen Einzugsgebiet des Bergbaus. Dieses Fließsystem ist dem oberirdischen Einzugsgebiet gleichzusetzen und speist sich aus direkt über dem Grubengebäude versickernden Niederschlagswässern. Es weist ein hohes Lösungspotenzial bezüglich der hier vorhandenen Sulfatminerale auf. Dieser lokale Grundwasseranteil ist für die geotechnische Betrachtung von größter Relevanz. Die qualitative und quantitative Trennung der beiden Grundwässer unterschiedlicher Herkunft war daher das Ziel der von uns durchgeführten Arbeiten.

Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

Der aufgelassene Gipsbergbau liegt am Nordostrand der Nördlichen Kalkalpen in Niederösterreich, im Gemeindegebiet von Hinterbrühl (Abb. 1). Es handelt sich um einen dicht besiedelten Raum wenige Kilometer südwestlich von Wien. Die Bergbauanlage liegt im Übergangsbereich zwischen dem ebenen Wiener Becken und den südwestlich davon aufragenden Nördlichen Kalkalpen auf einer Seehöhe zwischen 220 und 280 m (über Adria).

Das Untersuchungsgebiet wird von Gesteinen des sogenannten Haselgebirges aufgebaut. Dabei handelt es sich um permotriadische Ablagerungen, die durch feinklastische und evaporitische Lagen charakterisiert sind und die in flachen Lagunenbereichen abgelagert wurden. Diese gips- und tonreichen Lagen werden im Norden des Untersuchungsgebiets von Quarziten unterlagert (Plöching 1979). Im südlich angrenzenden Hangenden wird das Haselgebirge transgressiv von Werfener Schichten (Sand- und Siltsteine) überlagert, die dann weiter südlich von mächtigen Kalken und Dolomiten bedeckt werden (Wessely 2006).

Beschreibung der Grubenanlage

Der Gipsbergbau wurde zwischen der Mitte des 19. und dem frühen 20. Jahrhundert betrieben. Nach der Einstellung des Abbaubetriebs diente die Stollenanlage verschiedensten Zwecken (Lagerung, Produktion von Kriegsgeräten) und wird aktuell unter der Bezeichnung „Seegrotte“ touristisch genutzt.

Das orographische Einzugsgebiet des Grubengebäudes wird von einer etwa 40 m über das Vorflutniveau ansteigenden Anhöhe gebildet und umfasst eine Fläche von ca. 0,2 km². Die Erhebung ist teilweise mit Wohngebäuden und Straßen bebaut. Der größte Bereich (ca. 85 %) des Einzugsgebiets ist bewaldet bzw. von Grünflächen bedeckt. Die gesamte Anhöhe wird von Gesteinen des Haselgebirges aufgebaut, die hier bereichsweise als gipsreich, bereichsweise als

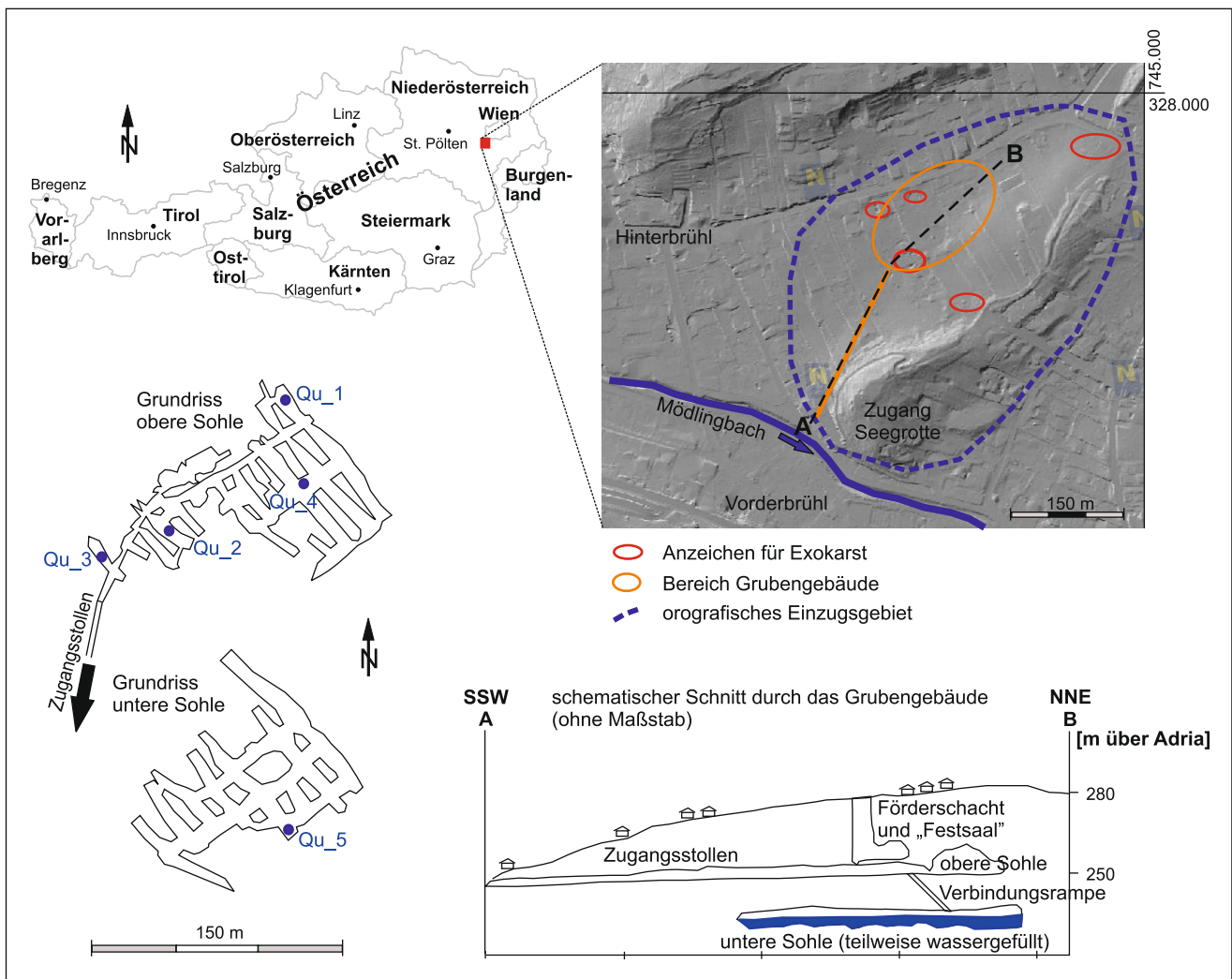


Abb. 1 Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit orographischem Einzugsgebiet, Karsterscheinungen an der Oberfläche sowie der ungefähren Lage des Grubengebäudes, Profilschnitt und Grundrisse der beiden Sohlen des Grubengebäudes mit den untersuchten Wasserzutritten

tonreich beschrieben werden (Wessely 2006). Im Zuge der Oberflächenkartierung wurden oberhalb des Grubengebäudes einige Geländemulden festgestellt, die jeweils nur wenige Meter im Durchmesser und Absenkungen gegenüber der Umgebung von einigen Dezimetern zeigen und als Ansätze von Dolinen gedeutet werden können. Deutlicher ausgeprägte Exokarsterscheinungen liegen im Gebiet nicht vor.

Südlich des Stollens verläuft der Mödlingbach mit Abflussmengen in der Größenordnung von hundert Litern pro Sekunde. Oberflächliche Zuflüsse aus dem orographischen Einzugsgebiet der Bergbauanlage zum Mödlingbach gibt es nicht. Im nördlichen Randbereich des Einzugsgebiets wird in alten Aufzeichnungen der Gemeinde eine Quelle beschrieben, die direkt am Austritt unterirdisch in einen bestehenden Regenwasserkanal abgeleitet wird. Informationen über die genaue Lage sowie Schüttungsmengen dieser Quelle konnten nicht erhoben werden.

Das Grubengebäude erstreckt sich über zwei Sohlen mit einer horizontalen Ausbreitung von rund 180×160 m bei einer Fläche von ca. 6.000 m^2 und durchschnittlichen Stollendurchmessern von ca. 10 m. Die Überlagerungsmächtigkeiten liegen zwischen 11 und 27 m. Das Grubengebäude wird von einem ca. 205 m langen und ca. 2,5 m hohen gemauerten Zugangstollen von Südwesten her erschlossen und ist zusätzlich über einen senkrechten Förderschacht im zentralen Bereich der Grubenanlage mit der Oberfläche verbunden. Eine Darstellung des Grubengebäudes ist dem Profilschnitt und den Grundrissen der beiden Abbausohlen in Abbildung 1 zu entnehmen. Die hier dargestellten fünf punktuellen Quellen sowie die zahlreichen diffusen Wasserzutritte der oberen Sohle können im freien Gefälle über das Stollenmundloch mit einer Gesamtschüttungsmenge von durchschnittlich knapp $0,6 \text{ l/s}$ zum Vorfluter abfließen, wobei auch nach längeren Trockenperioden nie geringere Schüttungsmengen als $0,45 \text{ l/s}$ gemessen wurden. Die geringen Was-

serzutritte (punktuelle Zutritt von etwa 0,04 l/s und diffuse Zutritte in unbekannter Menge) in der unteren Sohle werden hier aufgestaut und in unregelmäßigen Abständen künstlich abgepumpt. Es besteht kein natürlicher Abfluss aus den künstlich angelegten Hohlräumbauten.

Auffällig an den punktuellen Wasserzutritten, die jeweils aus Dezimeter bis Meter großen Hohlräumen in gipsreichen Abschnitten aus der Stollenfirste austreten, ist eine starke Versinterung. Die Sinter wurden im Rahmen geochemischer Untersuchungen als reine Kalksinter identifiziert.

Methodik

Hydrogeologische Kartierung, Abflussmessung, Wasserbilanz

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde das orographische Einzugsgebiet obertägig und innerhalb des Grubengebäudes geologisch und hydrogeologisch kartiert.

Die Geländeaufnahme im orographischen Einzugsgebiet bezog sich dabei vor allem auf geologische und morphologische Anzeichen für Verkarstungen, die mithilfe von Laserscandaten ergänzt wurden, um punktuelle Versickerungen von Niederschlägen zu lokalisieren und diese möglichst in räumlichen Bezug zu den untertägig festgestellten Wasserzutritten zu bringen. Auf Basis von Luftbildern wurden außerdem die versiegelten Flächen (Dachflächen, Straßen) im Einzugsgebiet mengenmäßig erfasst. Untertage wurden alle punktuellen Wasserzutrittsstellen räumlich erfasst. Diffuse Wasserzutritte, die sowohl im Zugangstollen als auch im gesamten Grubengebäude festgestellt wurden, wurden quantitativ über die Messung des Gesamtabflusses aus der oberen Stollenebene erfasst. Die Lage möglicher Exokarststrukturen an der Oberfläche sowie jene der punktuellen Zutritte im Stollen ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Die Messung des Gesamtabflusses der Grubenanlage erfolgte mit einem kontinuierlich aufzeichnenden induktiven Durchflussmessgerät zwischen Mai 2011 und Mai 2012. Eine weitere kontinuierlich aufzeichnende Messeinrichtung wurde am größten punktuellen Wasserzutritt (Qu_1) im Stollen installiert. Zusätzlich zur Schüttungsmenge wurden hier jeweils Temperatur und elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet. Die kontinuierlichen Messungen wurden sowohl an Qu_1 als auch am Gesamtabfluss in Intervallen von drei Minuten durchgeführt und als Stundenmittelwerte ausgewertet. Die weiteren vier Wasserzutritte wurden im Rahmen wöchentlicher Stichtagsmessungen erfasst.

Für das Einzugsgebiet wurden die Niederschlagsmengen und Temperaturdaten der umliegenden Messstationen erhoben (Lebensministerium 2012a). Zur Bestimmung des Gebietsniederschlags im Bereich des untersuchten Grubengebäudes wurden Daten der Messstellen Baden, Lainzer Tor,

Wien Rosenhügel, Gumpoldskirchen und Laab am Walde verwendet. Neben der Information über die jährliche Gesamtniederschlagsmenge sowie über einzelne Niederschlagsereignisse im Untersuchungszeitraum, dienen diese Daten auch als Grundlage für eine überschlägige Verdunstungsberechnung nach Turc (1954).

Die Kombination der erhobenen Niederschlagsganglinien mit den kontinuierlich erfassten Schüttungsmengen im Stollenbereich wurde außerdem zum Verständnis der Fließdynamik im Karstaquifer herangezogen. Ziel war dabei, eine quantitative Trennung von Basisabfluss (unterirdisches regionales Fließsystem) und kurzfristigem niederschlagsgebundenem Abfluss (oberirdisches lokales Fließsystem) zu ermöglichen. Auf Basis der erhobenen und gemessenen Daten wurde eine überschlägige Wasserbilanz für das orographische Einzugsgebiet erstellt.

Hydrochemische Modellierung

Die hydrochemische Modellierung wurde mithilfe der Software PHREEQC (Parkhurst & Apello 1999) durchgeführt.

Ziel der *hydrochemischen* Modellrechnungen war es einerseits, die mithilfe der Schüttungsganglinie erarbeitete Auftrennung von Basisabfluss und niederschlagsabhängigen Abfluss anhand der hydrochemischen Zusammensetzung der Wässer zu verifizieren. Andererseits diente die Modellierung der Berechnung der tatsächlich aus der Überlagerung des Grubengebäudes gelösten Gipsmengen und damit einer Abschätzung der Verkarstungsraten.

Eine einfache Berechnung der Lösungsfrachten allein aus der Konzentration der Wässer am Grubenausgang, hochgerechnet auf die ermittelte Schüttungsmenge, würde die gesamte Lösungsfracht auf das Grubengebäude beziehen und damit den Einfluss des beteiligten unterirdischen Fließsystems außer Acht lassen. Dies würde zu einer deutlichen Überbewertung der lokalen Verkarstungsraten und damit zu einer Fehleinschätzung der langfristigen Stabilität führen. Nach der oben eingeführten Arbeitshypothese zweier beteiligter Fließsysteme, sind für die Verkarstung der Überdeckung des Grubengebäudes nur die untersättigt in den lokalen Aquifer eintretenden Niederschlagswässer verantwortlich. Um dies bei der Berechnung von Verkarstungsraten zu berücksichtigen, wurden die Mischungsprozesse zwischen bereits an Gips gesättigten unterirdisch zufließenden Grundwässern und untersättigt in den Aquifer eintretenden Niederschlagswässern berechnet. Basis für die angesetzten Mischungsverhältnisse bildeten die Auswertungen der Schüttungsganglinie des Gesamtabflusses.

In Abbildung 2 werden die Prozesse Infiltration, Mischung der beiden Wassertypen und Austritt im Stollen in der Weise dargestellt, wie sie in das hydrochemische Modell eingearbeitet wurden. Die Zusammensetzung der an der Modellierung beteiligten Wässer ist Tabelle 1 zu entnehmen.

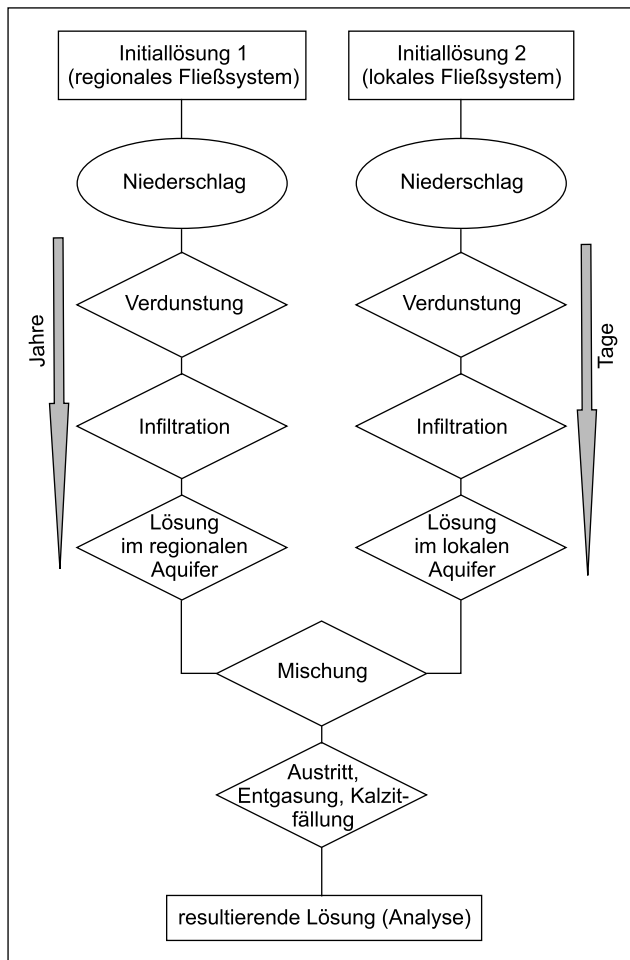


Abb. 2 Schematische Beschreibung der modellierten hydrochemischen Prozesse

Als Initiallösungen wurden charakteristische Wasserzusammensetzungen für das regionale Fließsystem sowie für die lokal kurzfristig eintretenden Niederschlagswässer modelliert. Die chemische Zusammensetzung des Niederschlags als Input für beide Wasseranteile wurde der Studie Leder et al. (1995–2004), ermittelt an der nahe gelegenen Station Lainz, entnommen, um so die regionale und vermutlich anthropogen beeinflusste Niederschlagszusammensetzung des dicht besiedelten Raumes um Wien zu berücksichtigen. Nach einer Aufkonzentration der Niederschläge gemäß den ermittelten Verdunstungsraten, erfolgt während der Infiltration eine hydrochemische Beeinflussung der Wässer durch die ungesättigte Bodenzone. In der Modellierung wurde dies durch eine Anhebung des CO_2 -Partialdrucks umgesetzt. Mangels gesicherter Daten des Untersuchungsraumes, wurden hierfür der Literatur (z. B. Merkel & Planer-Friedrich 2008 oder Scheffer & Schachtschabel 2010) mittlere Bodenluftkonzentrationen für vergleichbare Einzugsgebiete entnommen und ein erhöhter CO_2 -Partialdruck von 1,65 Vol% CO_2 angenommen.

Im regionalen Fließsystem erfahren die Wässer nach Durchlaufen der Bodenzone aufgrund ihrer längeren Verweilzeiten eine Sättigung der im Aquifer vorhandenen Karbonat- und Sulfatphasen, während die Wässer des lokalen Fließsystems nicht mit Karbonaten in Kontakt kommen und vor allem Sulfatphasen lösen können.

Nach einer Mischung beider Wässer im orographischen Einzugsgebiet kommt es zum Austritt der Mischwässer, der einhergeht mit einer CO_2 -Entgasung und der beobachteten starken Kalk-Sinterbildung an den Wasseraustritten im Grubengebäude. Die auf diese Weise modellierte Zusammen-

Tab. 1 Gemessene und modellierte Stoffmengenkonzentrationen des Gesamtabflusses. Analysierte Werte stellen gewichtete Mittelwerte aus vier Messkampagnen (2000, 2007, 2008 und 2012) dar

	pH	Ca [mmol/l]	Mg [mmol/l]	Na [mmol/l]	K [mmol/l]	HCO_3 [mmol/l]	SO_4 [mmol/l]	Cl [mmol/l]
Regenwasser	5,22	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Verdunstung	4,26	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00	0,04	0,02
Bodenluft	7,49	0,73	4,55	0,03	0,00	11,20	0,04	0,02
Initiallösung 1	7,42	14,71	4,54	1,12	0,10	11,19	14,02	1,21
Initiallösung 2	7,09	13,07	2,31	0,81	0,12	5,35	13,07	0,92
Mischung	7,36	14,30	3,98	1,04	0,10	9,73	13,78	1,13
Modell (resultierende Lösung)	7,99	11,72	3,98	1,04	0,10	3,77	13,78	1,13
Analyse (Mittel aus 23 Proben)	7,76	12,55	4,94	1,28	0,12	6,54	14,24	5,55
gewichtetes Minimum	7,30	11,94	4,63	1,01	0,11	6,31	13,35	3,63
gewichtetes Maximum	8,23	13,17	5,34	1,66	0,13	6,84	15,12	8,20
negative Abweichung	0,47	0,61	0,31	0,27	0,01	0,23	0,89	1,92
positive Abweichung	0,47	0,62	0,39	0,37	0,01	0,31	0,88	2,65
Differenz Analyse/Modell [%]	−5,18	13,94	−19,37	−18,69	−15,50	48,80	−3,23	−79,55

setzung spiegelt die hydrochemische Situation nach diesen Teilschritten und damit die resultierende Lösung wider.

Für die Validierung des Modells wurden hydrochemische Datensätze aus vier Probenkampagnen in den Jahren 2000, 2007, 2008 und 2012 (Entnahme jeweils bei mittleren Schüttungsmengen) verwendet. Die Analysen erfolgten gemäß den Vorgaben der entsprechenden EN ISO-Normen durch ein zertifiziertes Labor für Wasseranalytik. Es wurden die Kationen (Ca, Mg, K, Na) und Anionen (HCO_3 , Cl, SO_4) sowie die Summenparameter elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur analysiert. Die entsprechend der jeweiligen Schüttungsmengen gewichteten Mittelwerte der Analysen werden mit der modellierten resultierenden Lösung verglichen. Je besser das hydrochemische Modell die Mischungsverhältnisse im Aquifer abbildet, umso genauer muss die modellierte resultierende Lösung die analysierte Zusammensetzung des Gesamtabflusses wiedergeben.

Die Lösungsfrachten aus der Überlagerung des Grubengebäudes können dem hydrochemischen Modell direkt entnommen werden, indem die berechneten gelösten Gipsmengen auf den ermittelten mittleren Abfluss des oberirdischen Fließsystems hochgerechnet werden.

Isotopenanalyse

Im Zeitraum September 2011 bis August 2012 wurden monatlich Wasserproben entnommen, um diese auf das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotope $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ zu untersuchen und damit den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert zu ermitteln, der sich relativ zum Vienna-Standard-Mean-Ocean-Water (V-SMOW) ergibt. Die Analysen wurden im Laborzentrum für Isotopenhydrologie und Umweltanalytik des Joanneum-Research-Center in Graz mit einem analytischen Fehler von $\pm 0,15\%$ durchgeführt. Die Betrachtung stabiler Isotope als Ergänzung des bisher beschriebenen Methodenspektrums diente dem Ziel, die berechneten Anteile eines regionalen Fließsystems am Gesamtabfluss zusätzlich über dessen längere Verweilzeit zu verifizieren. Über die Betrachtung der Dämpfung saisonaler Schwankungen der Gehalte an schweren Isotopen lassen sich mittlere Verweilzeiten bis zu 5 Jahren grob abschätzen (Clark & Fritz 1997). Ein bedeutender Anteil an sehr kurzfristig verweilenden Wässern aus dem orographischen Einzugsgebiet spiegelt sich in einem ausgeprägten Jahresgang der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte entsprechend den Schwankungen im Regenwasser wider. Finden sich die saisonalen Schwankungen des Regenwassereintrags nicht im Quellwasser wieder, so kann von entsprechend längeren Verweilzeiten und einer Vermischung von Wässern verschiedenen Alters ausgegangen werden. Als Referenzmessstelle für die Isotopenzusammensetzung des Gebietsniederschlags wurde die Messstelle Hohe Warte des Austrian Network of Isotopes in Precipitation (ANIP) (Lebensministerium 2012b) herangezogen.

Ergebnisse

Auswertung der Zeitreihenmessungen

Abbildung 3a zeigt die Schüttungsganglinien des Gesamtabflusses und des schüttungsstärksten punktuellen Wasserzutritts Qu_1 im Grubengebäude über den Beobachtungszeitraum Mai 2011 bis Mai 2012 in Kombination mit den Niederschlagsaufzeichnungen der nächstgelegenen Messstation Maria Enzersdorf. Bei einem Mindestabfluss von etwa 0,45 l/s zeigen sich kurzfristige Schüttungsanstiege auf maximal 0,75 l/s, die nach Ende eines Niederschlagsereignisses relativ kurzfristig wieder abklingen. Insgesamt wurde im Beobachtungsjahr ein leicht fallender Trend festgestellt, der auf vergleichsweise geringe Schneemengen im Winter 2011/12 sowie geringe Frühjahrsniederschläge im Jahr 2012 im regionalen Einzugsgebiet zurückgeführt werden kann.

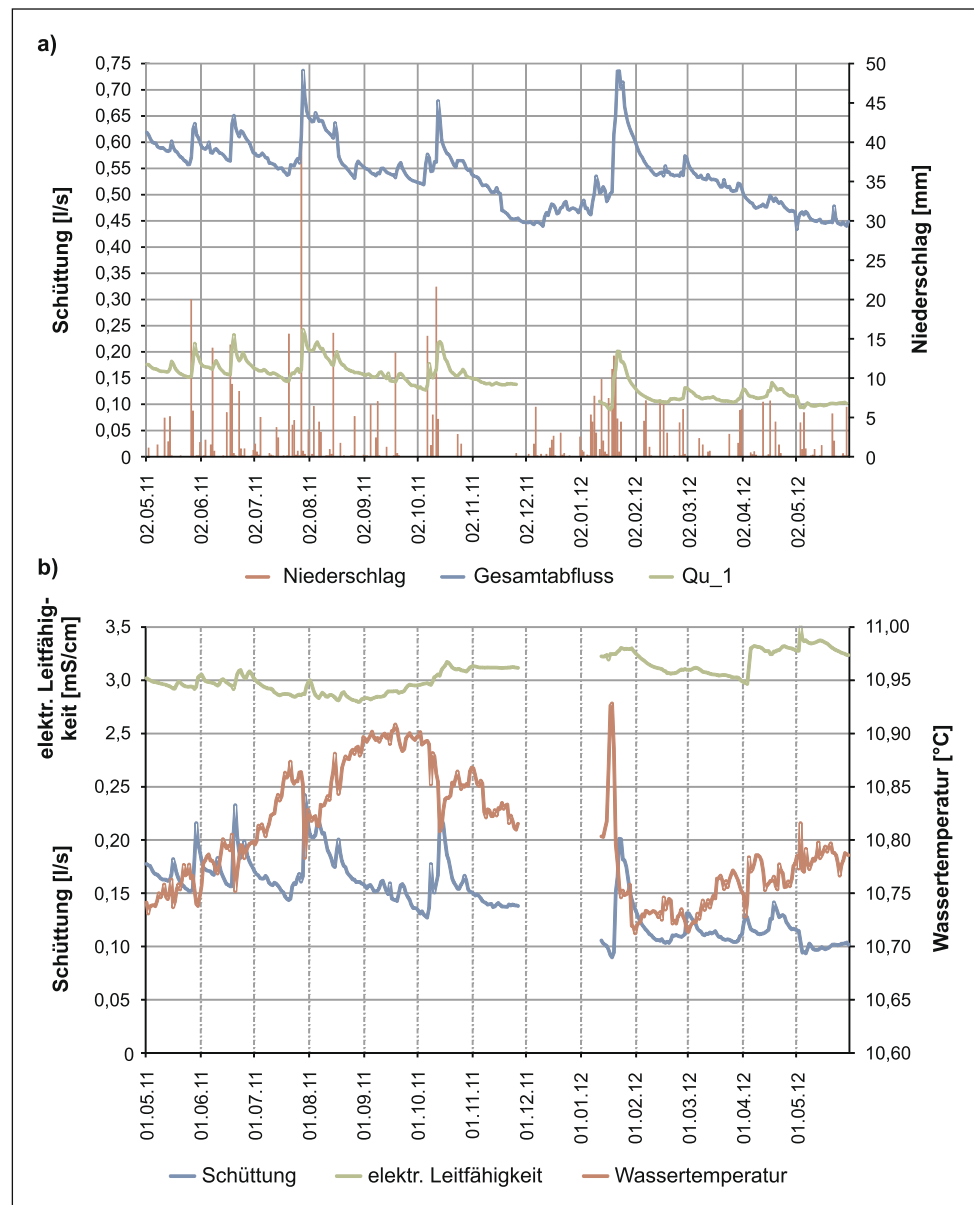
Der mittlere Gesamtabfluss aus dem Stollen liegt im Beobachtungsjahr bei 0,57 l/s (ermittelt aus Stundenmittelwerten auf Basis des dreiminütigen Messintervalls). Der auf ein Jahr gemittelte Abfluss aus dem lokalen Fließsystem kann damit auf etwa 0,15 l/s abgeschätzt werden. Die Kurve zeigt den typischen Verlauf einer Quelle, die durch ein diffuses Fließsystem mit Basisabfluss versorgt wird, auf den sich kurzfristige Abflüsse eines röhrenartigen Karstsystems im direkten Einzugsgebiet aufsetzen. Davon ausgehend, dass der ermittelte dauerhafte Mindestabfluss dem regionalen Basisabfluss entspricht und die jeweils kurzfristig auftretenden zusätzlichen Schüttungsmengen dem lokalen Fließsystem angehören, ergibt sich eine rechnerische Verteilung des jährlichen Gesamtabflusses auf Basisabfluss (0,45 l/s) und niederschlagsabhängigem Abfluss (0,15 l/s) von 3:1.

Eine systematische zeitliche Verzögerung der Schüttungsanstiege von 2–3 Tagen nach dem Niederschlagsereignis zeigt sich sehr deutlich an Qu_1. Der Gesamtabfluss spiegelt Starkniederschläge bereits nach einem Tag wider.

In Abbildung 3b sind die kontinuierlich erfassten Werte der Wassertemperatur sowie der elektrischen Leitfähigkeit in Zusammenhang mit der Schüttungsmenge von Qu_1 dargestellt. Der Jahresgang mit höchsten Temperaturen im September und einem Temperaturminimum im Februar zeigt mit Werten im Bereich zwischen 10,7 und 10,95 °C insgesamt sehr geringe Variationen. Es fällt jedoch auf, dass die Wassertemperaturen zu jeder Jahreszeit mit zunehmender Schüttungsmenge abnehmen und damit also selbst die Sommerniederschläge im Einzugsgebiet geringere Temperaturen aufweisen als der regionale Basisabfluss. In Bezug auf die Jahresmitteltemperatur im Bereich des orographischen Einzugsgebiets von 10,4 °C (Lebensministerium 2012a), ist die Wassertemperatur immer leicht erhöht.

Ein Verdünnungseffekt ist aus der Messung der elektrischen Leitfähigkeiten nicht ablesbar. Stattdessen ist ein Anstieg der Gesamtmineralisierung mit zunehmender Schüttungsmenge zu beobachten. Die kurzfristig zugeführten

Abb. 3 (a) Schüttungsganglinien „Gesamtabfluss“ und „größter punktueller Wasserzutritt“ (Qu_1) im Stollen in Kombination mit den Niederschlagsdaten der Messstation Maria Enzersdorf. (b) Schüttung, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit des größten punktuellen Wasserzutritts (Qu_1) in den Stollen. Der dokumentierte Datenausfall im Herbst 2011 ist auf einen versinterungsbedingten Ausfall der Messeinrichtung zurück zu führen



oberflächlichen Wasser des lokalen Aquifers führen damit im Vergleich zum unterirdischen Zufluss nicht nur kältere sondern auch höher mineralisierte Wässer. Die höhere Mineralisierung kann durch die kurzfristig mobilisierte Lösungsfracht direkt aus dem überlagernden Haselgebirge erklärt werden, während die Wässer des Basisabflusses aus den Kalken und Sand- und Siltsteinen der Werfener Schichten eine vergleichsweise geringere Mineralisierung liefern.

Wasserbilanz

Im regionalen Einzugsgebiet des Untersuchungsraumes ergibt sich aus der Auswertung benachbarter Messstellen (Lebensministerium 2012a) ein langjähriges jährliches Niederschlagsmittel von 740 mm/a. Die Verdunstung wurde nach

Turc (1954) zunächst für alle verwendeten Klimamessstellen ermittelt und dann durch Interpolation für den Untersuchungsraum auf 470 mm/a berechnet. Die verbleibenden 270 mm/a stehen damit für ober- und unterirdischen Abfluss zur Verfügung.

Das orographische Einzugsgebiet beträgt 0,2 km². Da keine natürlichen Oberflächenabflüsse vorhanden sind, muss sich diese Summe auf die Versickerung sowie auf die künstlich abgeleiteten Niederschlagswässer der versiegelten Flächen verteilen. Eine Auswertung der Luftbilder zeigt, dass etwa 15 % der betroffenen Fläche versiegelt ist, hier werden also ca. 40 mm/a abgeleitet, sodass 230 mm/a dem unterirdischen Abfluss zuzurechnen sind.

Der mittlere Gesamtabfluss aus dem Grubengebäude beträgt knapp 0,6 l/s, wobei jedoch auf Basis der bisher be-

schriebenen Auswertungen nur ca. 0,15 l/s tatsächlich dem orographischen Einzugsgebiet des Bergwerks zugerechnet werden. Dies entspricht etwa 30 mm/a oder einem Einzugsgebiet von 0,02 km², also nur einem Zehntel der Fläche des orographischen Einzugsgebiets. Es verbleiben demnach knapp 200 mm/a, die zu einem geringen Anteil über die untere Grubensohle abgeführt werden und zu einem weiteren, nicht quantifizierbaren Anteil, aus der oben erwähnten Quelle über die Regenwasserkanalisation abgeleitet werden. Ein weiterer Anteil wird offenbar einem längerfristigen nicht anthropogen überprägten Aquifer zugeführt und entwässert möglicherweise diffus in den Vorfluter Mödlingbach.

Hydrochemische Modellierung

Generelle Vorüberlegungen zur hydrochemischen Modellierung wurden bereits im Kapitel Methodik erläutert.

In Tabelle 1 sind die gemessenen Zusammensetzungen der Niederschlagswässer, die modellierten Zusammensetzungen der beiden beteiligten Grundwässer, die im Verhältnis 3:1 (Basisabfluss zu oberirdischen Abfluss) gemischt werden und im Grubengebäude als modelliertes resultierendes Mischwasser unter CO₂-Entgasung und Kalzitfällung austreten, angeführt. Diese modellierte resultierende Lösung wird zur Verifizierung der berechneten Verteilung mit dem analysierten Gesamtabfluss verglichen. Zum Vergleich wurden nach ihrer Schüttungsmenge gewichtete Mittelwerte aus insgesamt 23 Proben (Gesamtabfluss und punktuelle Zutritte) herangezogen. Deutliche Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Konzentrationen zeigen sich bei den Parametern Hydrogenkarbonat und Chlorid. Da es im lokalen Einzugsgebiet keine Anhaltspunkte für das Auftreten von Halit gibt (auch geochemische und petrologische Untersuchungen, die im Rahmen der zugehörigen geotechnischen Studie (Gschwandtner et al. 2013) getätigt wurden, haben hierfür keine Hinweise geliefert), sind die festgestellten Werte möglicherweise auf einen anthropogen bedingten Eintrag aus der Straßensalzung zurückzuführen. Die Abweichung beim Parameter Hydrogenkarbonat lässt sich möglicherweise durch die unzureichende Kenntnis der CO₂-Lösungs- und Entgasungsprozesse in der Bodenzone und beim Austritt erklären und gibt damit eine wesentliche Unsicherheit des hydrochemischen Modells wieder. Wesentlich für die Fragestellungen der Gipskarstbildung ist aber die gute Übereinstimmung der Kalzium- und Sulfatgehalte, die sich vor allem aus den Lösungsprozessen im lokalen Aquifer und der anschließenden Mischung mit den kalzit- und gipsgesättigten Wässern des regionalen Aquifers ableiten lassen.

Zur Quantifizierung der Lösungsfrachten aus der Überlagerung wurden die hydrochemischen Prozesse in der Initiallösung 2 (orographisches Einzugsgebiet) bis zur Sättigung mit Gips betrachtet und auf den hier abfließenden Anteil von einem Viertel an der Gesamtschüttung bezogen. Die

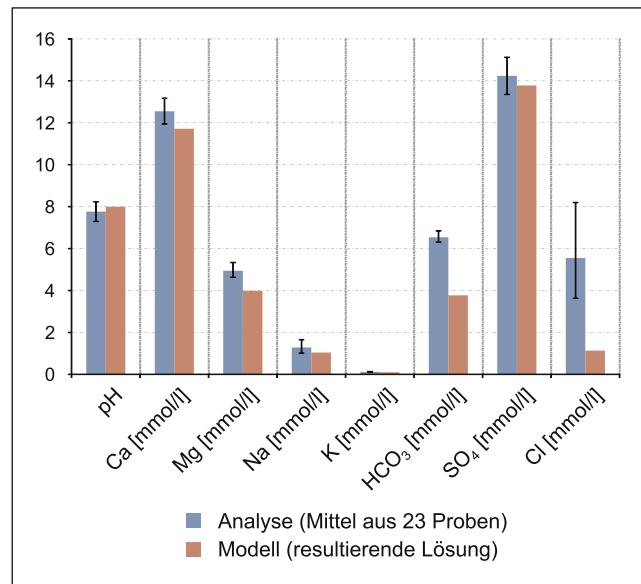


Abb. 4 Vergleich der analysierten mit der modellierten Zusammensetzung der Stollenwässer

Berechnungen ergaben eine gelöste Menge an Gips von ca. 14 mmol/l was einer Stoffmenge von etwa 2.365 mg/l entspricht. Hochgerechnet auf den ermittelten durchschnittlichen kurzfristigen Abfluss ergibt dies eine Lösungsfracht von ca. 11.200 kg oder etwa 5 m³ an Gipslösung pro Jahr.

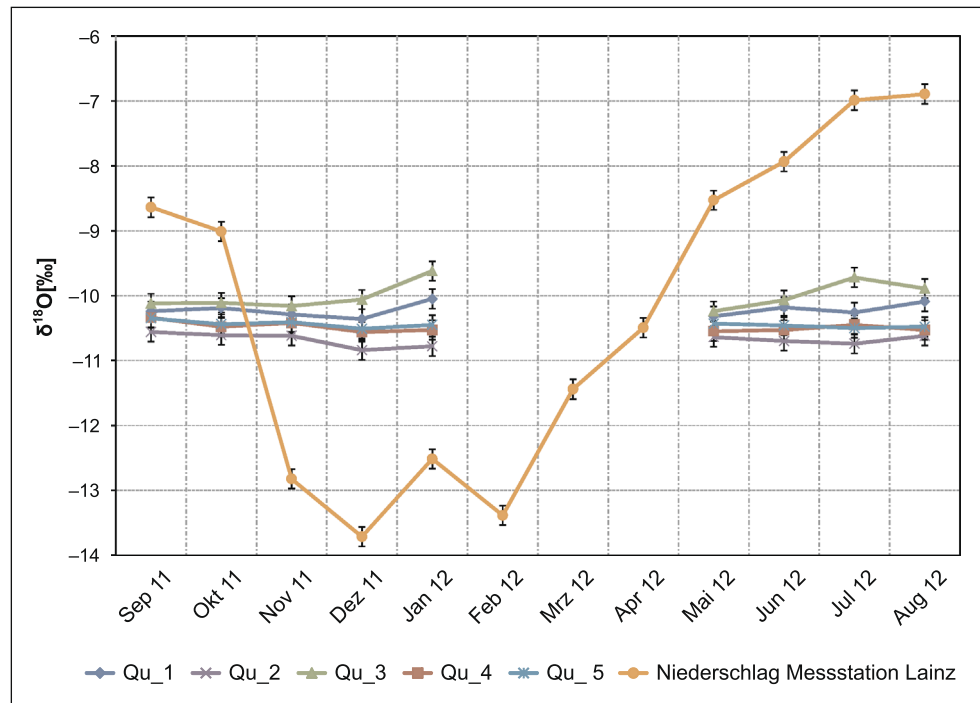
In Abbildung 4 ist der Vergleich zwischen analysierter und modellierter Zusammensetzung der Hauptparameter unter Berücksichtigung der Streubreite der Messwerte dargestellt.

Isotopenanalyse

Die Isotopenuntersuchungen hatten vor allem das Ziel, die These eines großen Anteils an länger verweilenden Wässern an der Gesamtschüttung im Grubengebäude mit einer zusätzlichen Methodik zu verifizieren. Da das orographische Einzugsgebiet des Grubengebäudes mit 0,2 km² sehr klein, die Überdeckung mit wenigen Zehnermetern gering und die Verzögerung zwischen Niederschlagsereignis und Schüttungsanstieg im Stollen mit 1 bis 3 Tagen sehr kurz ist, müssten sich jahreszeitlich bedingte Schwankungen der Isotopensignatur im Niederschlag direkt auf die Grubenwässer übertragen. Kann dies nicht beobachtet werden, muss von einer Überlagerung des Isotopensignals durch länger verweilende Wässer in einem wesentlich größeren Aquifer ausgegangen werden. Innerhalb dieses regionalen Aquifers kommt es zu einer Vermischung von Wässern aus verschiedenen Niederschlagsereignissen, und damit zu einem Ausgleich jahreszeitlich bedingter Schwankungen. Tabelle 2 und Abbildung 5 zeigen die gemessenen δ¹⁸O-Werte aller punktuellen Wasseraustritte im Stollen. Auf eine Beprobung des Gesamtabflusses wurde wegen der langen Fließstrecke im Stollen und der dabei zu erwartenden weiteren

Tab. 2 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit Variationsbreiten und Mittelwerten der punktuellen Wasserzutritte im Stollen sowie des Niederschlags an der ANIP-Messstation Lainz aus dem Untersuchungszeitraum September 2011 bis August 2012

	Sep 11	Okt 11	Nov 11	Dez 11	Jan 12	Mai 12	Jun 12	Jul 12	Aug 12	Min	Max	Mittelwerte
	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Qu_1	-10,24	-10,19	-10,29	-10,36	-10,05	-10,32	-10,18	-10,26	-10,09	-10,36	-10,05	-10,22
Qu_2	-10,56	-10,61	-10,62	-10,84	-10,78	-10,64	-10,70	-10,74	-10,62	-10,84	-10,56	-10,68
Qu_3	-10,12	-10,11	-10,16	-10,06	-9,62	-10,24	-10,07	-9,72	-9,89	-10,24	-9,62	-10,00
Qu_4	-10,34	-10,48	-10,42	-10,56	-10,53	-10,55	-10,53	-10,45	-10,53	-10,56	-10,34	-10,49
Qu_5	-10,35	-10,44	-10,41	-10,51	-10,45	-10,43	-10,46	-10,50	-10,48	-10,51	-10,35	-10,45
Niederschlag	-8,6	-9,0	-12,8	-13,7	-10,5	-8,5	-7,9	-7,0	-6,9	-13,72	-6,89	-9,45

Abb. 5 Isotopenzeitreihen der punktuellen Wasserzutritte im Stollen; Bezug zur nächstgelegenen Niederschlagsstation Hohe Warte. Die starke Dämpfung der saisonalen Schwankungen des $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes deutet auf mehrjährige Verweilzeiten der Wässer hin

Fraktionierungsprozesse verzichtet. Zwischen Januar und Mai 2012 wurde die Zeitreihe wegen Missverständnissen zwischen Probennehmer vor Ort und den Bearbeitern dieser Studien unterbrochen. Aufgrund der lückenhaften Zeitreihe ist eine rechnerische Auswertung z. B. nach Burgman et al. (1987) nicht sinnvoll, da die tatsächliche Amplitude der $\delta^{18}\text{O}$ -Variationen im Grundwasser nicht ermittelt werden kann. Zudem ist davon auszugehen, dass kurzzeitige Ereignisse in der Isotopenentwicklung mit den monatlichen Probenintervallen nicht in vollem Umfang erfasst werden. Dennoch zeigen die vorhandenen Daten deutlich, dass die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Grundwasser im Beobachtungszeitraum nur geringe Schwankungen mit Variationsbreiten der einzelnen Quellaustritte von 0,16 bis 0,6 ‰ bei einem Messfehler von 0,15 ‰ aufweisen, während die als Monatsmittelwerte erfassten Isotopenzusammensetzungen im Niederschlag über das Beobachtungsjahr eine Schwankungsbreite

von ca. 6,8 ‰ zeigen. Die Unterschiede in der Isotopensignatur zwischen den einzelnen Messstellen zeigen, dass die verschiedenen Zuflüsse aus dem unterirdischen Fließsystem unterschiedlichen Fraktionierungsprozessen ausgesetzt waren und damit vermutlich aus verschiedenen Einzugsgebieten stammen.

Im Vergleich mit den jahreszeitlich schwankenden Isotopenzusammensetzungen des Niederschlags, die von den Wasserzutritten nicht oder nur sehr schwach und zeitverzögert nachvollzogen werden, ergibt sich, dass ein überwiegender Anteil der in das Grubengebäude einströmenden Wässer mehrjährige Verweilzeiten im Aquifer aufweisen muss und damit einem vermutlich komplexen regionalen Fließsystem zugeordnet werden kann. Die Isotopendaten bestätigen damit grundsätzlich die über Schüttungsmessungen und Hydrochemie gewonnenen Erkenntnisse.

Diskussion/Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Bearbeitung wurden einige Grundannahmen getroffen, die nicht mit Daten belegt werden können. So sind zum Beispiel die Prozesse in der ungesättigten Bodenzone bei der hydrochemischen Entwicklung der Wässer nicht im Detail bekannt. In Unkenntnis der tatsächlichen Boden- und Bodenluftverhältnisse in den Infiltrationsgebieten wurde ein plausibler CO_2 -Partiladung, der sich während der Versickerung sowohl im lokalen als auch im regionalen System einstellt, angenommen. Dieser wirkt sich vor allem auf die Kalzitlösung im regionalen Einzugsgebiet aus, nicht aber auf die Gipskarstprozesse im lokalen Einzugsgebiet. Diesbezügliche Unsicherheiten werden daher für die Fragestellung als wenig relevant erachtet.

Die Wasseranalysen, die zur hydrochemischen Modellierung verwendet wurden, wurden bei mittleren Schüttungsmengen und daher einer mittleren Verteilung zwischen Basisabfluss und lokalem Abfluss genommen. Weitere Beprobungen bei verschiedenen hydrologischen Verhältnissen könnten dazu dienen, die hier präsentierten Ergebnisse zu präzisieren.

Gute Anhaltspunkte dafür, dass der hier angewendete Ansatz zweier unterschiedlicher Fließsysteme zutrifft und ein bedeutender Anteil der Wässer aus einem regionalen Aquifer stammt, ergeben sich aus den Zeitreihen der stabilen Isotope, die trotz der schnellen Reaktion der Wasseraustritte und des Gesamtabflusses auf Niederschläge und trotz des kleinen orographischen Einzugsgebiets und der geringen Überlagerung auf Verweilzeiten von mehreren Jahren hindeuten. Dies kann nur über eine mengenmäßig bedeutende Beteiligung eines übergeordneten Fließsystems erklärt werden.

Die Berechnungen der Wasserhaushaltsbilanz des Einzugsgebietes zeigen einige offene Punkte auf, die auf Basis der vorliegenden Daten nicht geklärt werden konnten. Nach Berechnungen von Gebietsniederschlag, Verdunstung und den messbaren Abflüssen verbleiben wesentliche Restmengen, die weder dem ober- noch dem unterirdischen Abfluss eindeutig zugerechnet werden können und die sich möglicherweise durch diffuse Zutritte in den Vorfluter oder durch den Eintritt in das regionale Fließsystem erklären lassen.

Durch die Auswertung des kontinuierlich erfassten Abflusses aus dem Grubengebäude konnte eine mengenmäßige Auftrennung von niederschlagsabhängigem Abfluss des lokalen Fließsystems und Basisabfluss aus dem regionalen Fließsystem erfolgen. Für diese Verteilung konnte ein durchschnittliches Verhältnis von 1:3 ermittelt werden. Die im Grubengebäude erfassten Messwerte für Temperatur und elektrische Leitfähigkeit zeigen, dass die zutretenden Wässer generell wärmer sind, als es die Jahresdurchschnittstemperatur im orographischen Einzugsgebiet vorgeben würde. Die kurzfristig zufließenden Wässer des oberirdischen Einzugsgebiets, die mit einer Verzögerung von maximal drei

Tagen über Karstschläuche in das Grubengebäude eindringen, sind kälter und höher mineralisiert als der Basisabfluss. Die höhere Mineralisation ist auf die gut löslichen Mineralphasen Gips und Anhydrit zurück zu führen.

Für die Fragestellung der Stabilität des Grubengebäudes sind jene Lösungsprozesse von Relevanz, die im lokalen Fließsystem und damit in der Überlagerung des Grubengebäudes stattfinden. Ziel der Untersuchungen war es daher, aus den am Gesamtabfluss festgestellten Lösungsfrachten jene Anteile zu berechnen, die im orographischen Einzugsgebiet gelöst wurden und nicht bereits aus dem regionalen Aquifer angeliefert wurden. Eine einfache Betrachtung der Gesamtlösungsfrachten (ermittelt aus den analysierten Sulfatgehalten) am Stollenausgang (Gesamtabfluss) ohne Berücksichtigung der hier beschriebenen Differenzierung zwischen zwei räumlich und genetisch unterschiedlichen Fließsystemen, würde Lösungsfrachten von bis zu 20 m^3 pro Jahr ergeben. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nur ein geringer Anteil des abfließenden Wassers tatsächlich die Überlagerung des Grubengebäudes durchflossen hat und hier hydrochemisch wirksam war, ergibt sich für diesen Bereich eine Verkarstungsrate von ca. 5 m^3 pro Jahr, also nur ein Viertel der ursprünglich für die geotechnische Langzeitprognose herangezogenen Mengen.

Das Beispiel zeigt, dass bei einer detaillierten Betrachtung der Grundwasserdynamik in Kombination mit den im Grundwasserkörper ablaufenden hydrochemischen Prozessen, wesentlich differenziertere Aussagen über die Verkarstungsproblematik im Einflussbereich aufgelassener Gipsbergbaue getroffen werden können. Dies kann sich direkt auf die resultierenden geotechnischen Stabilitätsbewertungen auswirken und als Grundlage für die Erstellung von Langzeitprognosen und damit auch für die Planung langfristiger erforderlicher Sicherungsmaßnahmen vergleichbarer Hohlraumbauten herangezogen werden.

Literatur

- Burgman, J.O., Calles, B., Westman, F.: Conclusion from a ten year study of oxygen-18 in precipitation and runoff in Sweden. In: Isotopic Techniques in Water Resources Development, IAEA Symposium 299, Vienna, S. 579–590 (1987)
- Clark, I., Fritz, P.: Environmental Isotopes in Hydrogeology, S. 328. Lewis Publisher, New York (1997)
- Gschwandtner, G., Galler, R., Wörgetter, V., Riepler, F., Hilberg, S.: Stabilitätsanalyse eines aufgelassenen Gipsbergbaus – von der geologisch-hydrogeologisch-geotechnischen Datenerfassung zur numerischen 3D-Simulation. *Berg. Huttenmann. Monatsh* **158**(2), 53–59 (2013)
- Gutierrez, F., Johnson, K.J., Cooper, A.H.: Evaporite karst processes, landforms, and environmental problems. *Environ. Geol.* **53**, 935–936 (2007)
- Kilchmann, S., Waber, H.N., Parriaux, A., Bensimon, M.: Natural tracers in recent groundwaters from different alpine aquifers. *Hydrogeol. J.* **12**, 643–661 (2004)

- Lebensministerium. <http://ehyd.gv.at/> (2012a). Zuletzt aufgerufen 28.05.2012
- Lebensministerium. <http://wisa.lebensministerium.at/h2o/qualitaetsdatenAbfrage.do?sessionId=F88B6F1100A36EE936441B6AA1B41ABD> (2012b). Zuletzt aufgerufen 10.10.2012
- Leder, K., Kalina, M.F., Puxbaum, H., Löffler, H., Kreiner, P., Tarmann, V.: Nasse Deposition im Land Wien 1994–2003, Techn. Universität Wien im Auftrag des Magistrats der Stadt Wien. unveröff. Berichte (1995–2004)
- Leitner, C., Neubauer, F., Genser, J., Borojević-Šoštarić, B., Rantitsch, G.: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of crystallisation and recrystallisation of rock-forming polyhalite in alpine rocksalt deposit. In: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating: from geochronology to thermochronology, from archaeology to planetary sciences. Geological Society, London (2013)
- Merkel, B., Planer-Friedrich, B.: Grundwasserchemie: Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, S. 242, 2. Aufl. Springer, Heidelberg (2008)
- Parkhurst, D.L., Apello, C.A.J.: User's guide to PHREEQC (version 2)—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, 321 S. U.S. Geological Survey, Virginia (1999)
- Plöchlinger, B.: Die Ergebnisse der geologischen Neuaufnahme des Anninger-Gebietes (Niederösterreich). *Jahrb. Geol. Bundesanst.* **122**, 429–453 (1979)
- Schauberger, O.: Bau und Bildung der Salzlagerstätten des ostalpinen Salinars. *Arch. Lagerstättenforsch. Geol. Bundesanst.* **7**, 217–254 (1986)
- Scheffer, F., Schachtschabel, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. Spektrum, Heidelberg (2010)
- Toth, J.: Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes and manifestations. *J. Hydrol.* **7**, 1–14 (1999)
- Turc, L.: Le bilan d'eau des sols, relations entre les précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.—Trois. J. d'Hydraul.*, 36–43 (1954)
- Wessely, G.: Niederösterreich, Geologie der österreichischen Bundesländer, S.416. Geologische Bundesanstalt, Wien (2006)