

Hydrochemische und isotopengeochemische (S, O) Veränderungen von Grubenwasser auf einem vertikalen Fließweg

Manuela Junghans, Marion Tichomirowa

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, Brennhaugasse 14, 09599 Freiberg, jung-hans@merkur.hrz.tu-freiberg.de, tichomir@mineral.tu-freiberg.de

The isotopic and chemical composition of water and dissolved sulfate of mine water from a mined and backfilled ore vein at the polymetallic sulfide deposit in Freiberg was used to study the mixing processes in mine water. It has been demonstrated that mine water with anomalous isotopic values is characterized by anomalous concentrations of anion, cations and metals, which is explained by a possible anthropogenic source. Using $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -values it has been calculated that 23 % to 62 % of sulfate in the mine water at the deepest level originate from sulfide oxidation. Isotope exchange as well as fixation processes may be the cause for larger variations of the $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -values at the deepest level investigated with higher residence times and lower flow rates of the mine water.

1 Einleitung und Untersuchungsziele

Stabile Isotope stellen natürliche Tracer dar, die Rückschlüsse auf Herkunft bzw. Mischungsverhältnisse von Wässern oder auf Prozesse, die die Wasserbeschaffenheit beeinflussen, erlauben. Die Isotopenverhältnisse des Schwefels und des Sauerstoffs können genutzt werden, um Aussagen über geochemische und biogeochemische Prozesse und Mischungsprozesse zu treffen, die in Bergwerken bzw. Grubenwässern ablaufen.

Fokus unserer Untersuchungen ist der abgebaute Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“, auf dem untertage ein Grubenwasser auf drei Teufenniveaus beprobbar ist. Aufgrund seiner guten Zugänglichkeit war dieser Erzgang in den vergangenen Jahren Gegenstand geochemischer und isotopengeochemischer Untersuchungen (WINKLER 1998; WINKLER et al. 2000; BAACKE 2000; HAUBRICH et al. 2000; HAUBRICH 2001; HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002). Die in diesem Artikel präsentierten weiterführenden Untersuchungen dienen einerseits der Erweiterung der Datenbasis für Isotopenwerte, andererseits der kombinierten Interpretation von geochemischen und isotopengeochemischen Daten, um zusätzlich Erkenntnisse über die zeitlichen Variationen von Mischungsprozessen und die Intensität der Sulfidoxidation zu gewinnen.

Die abgeleiteten zeit- und teufenabhängigen Zusammenhänge von geochemischen und isotopengeochemischen Parametern für den Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“ sind notwendig für die Interpretation von unregelmäßigen Messdaten im weiteren Umfeld der Grube Himmelfahrt (des Freiburger Reviers), die wir in einem weiteren Artikel vorstellen werden.

2 Lage und Geologie/ Mineralogie

Der Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“ war einer der bedeutendsten Erzgänge des Freiburger Reviers (zur Lage vgl. HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002). Er wurde vor allem im Zeitraum 1850 bis 1896 abgebaut und verfüllt. Dieser Erzgang, der zur Quarz-Polymetall-Assoziation gehört (BAUMANN et al. 2000), führt hauptsächlich Galenit, Pyrit, Sphalerit und Arsenopyrit als Erzminerale und vorrangig Quarz als Gangart. Das Nebengestein bildet der Freiburger Graugneis.

3 Veränderung der Wassermenge und der chemischen Zusammensetzung des Grubenwassers mit der Tiefe

Das Grubenwasser, das drei Abbaue auf seinem ca. 400 m langen, zumeist vertikalen Fließweg durchströmt, wurde auf drei Sohlen beprobt (Abb. 1). Die hydraulische Verbindung zwischen den Beprobungspunkten konnte anhand eines Tracerversuchs nachgewiesen werden (HAUBRICH et al. 2000; HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002). Die Fließzeit durch die Abbaue beträgt ca. eine halbe bis eine Stunde und deutet auf die Existenz größerer Wassertaschen hin (BAACKE 2000). HAUBRICH (2001) gibt auf allen drei Niveaus gleichbleibende Wassermengen an, wobei nur Messungen auf der 1. Sohle durchgeführt wurden. Im Gegensatz dazu wurde für die meisten Probenahmekampagnen in dieser Studie generell eine Abnahme der Wassermenge mit der Tiefe festgestellt. Unveränderte Wassermengen (von der Stollnsohle zur 1. Sohle sowie von der 1. zur ½ 3. Sohle) oder steigende Wassermengen (nur während der Probenahme am 1.7.2001) wurden seltener gemessen. Diese Beobachtungen werden auf eine Migration auf z.T. unterschiedlichen Fließwegen zurückgeführt. Wahrscheinlich werden in Zeiten mit erhöhtem Wasserangebot

(Schmelzperiode, nach längeren Niederschlägen) zusätzliche Fließwege mobilisiert.

Die geochemische Zusammensetzung des Grubenwassers wird von verschiedenen Prozessen wie Freisetzung aus den Primärsulfiden, aus dem Nebengestein und Fällungs- bzw. Fixierungsprozessen bestimmt. Nach BAACKE (2000) und WINKLER et al. (2000) entspricht das Grubenwasser der Stollnsohle einem Mischwasser aus Bodensickerwasser und Grundwasser. Der Eintrag von Schwermetallen, Al, As und Sulfat aus der Sulfidoxidation wird von WINKLER et al. (2000) als gering eingeschätzt und von HAUBRICH (2001) anhand von $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werten des Grubenwassers auf der Stollnsohle bestätigt. Auf dem Migrationsweg von der Stollnsohle zur 1. Sohle bzw. ½ 3. Sohle erfolgt eine Zumischung von hochmineralisierten Porenwässern aus der Verwitterungsmatrix in den Abbauen, die zu einer Absenkung des pH-Wertes und einer steigenden Gesamtmineralisation führen (BAACKE 2000).

Die Schwermetalle Cu, Fe, Mn, Pb und Zn sowie As entstammen direkt der Oxidation der Sulfide (BAACKE 2000; HAUBRICH et al. 2000), was durch eine positive lineare Korrelation mit der Sulfatkonzentration für die 1. und ½ 3. Sohle bestätigt wird. Im Gegensatz zu Zn, Fe, Mn und Cd, deren Konzentrationen und Frachten mit der

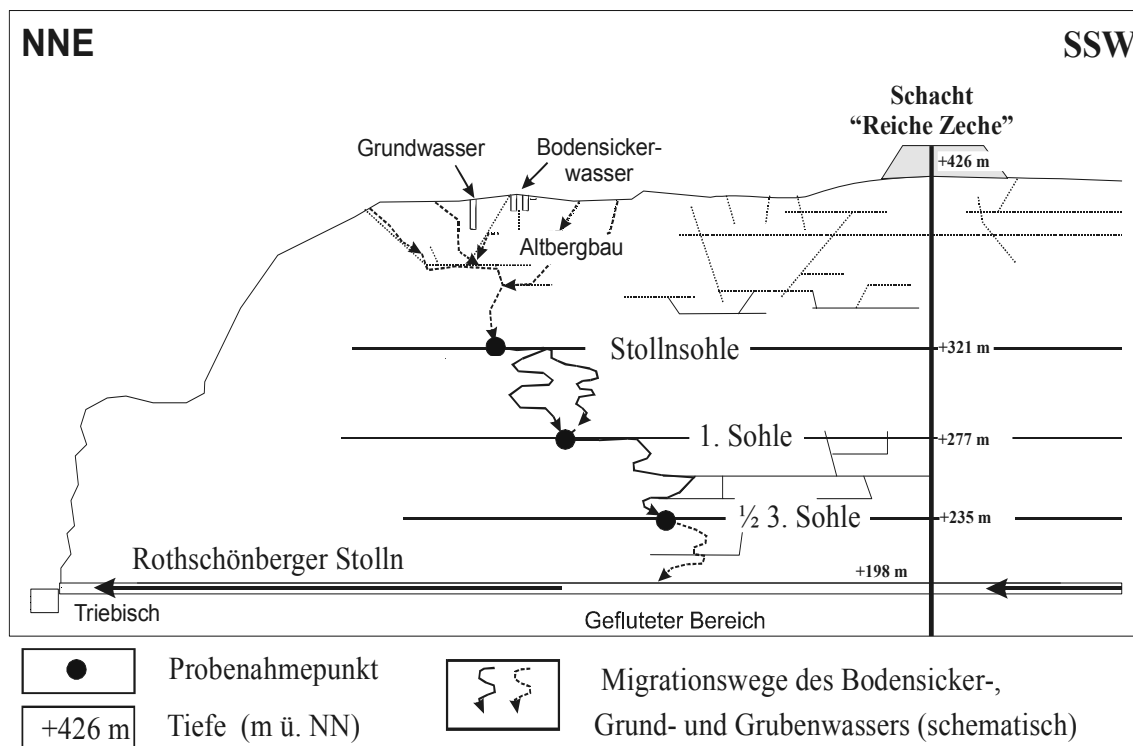


Abb. 1: Schematische Darstellung des untersuchten Migrationsweges auf dem Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“ (verändert aus HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002).

Tiefe steigen, werden As und Pb (teilweise) wieder fixiert. Als Senken kommen für Pb Anglesit $[\text{PbSO}_4]$ und Jarosit $[(\text{K}, \text{Pb})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ in Betracht (HAUBRICH et al. 2000; TICHOMIROVA et al. 2003). As wird vermutlich an Eisenhydroxidpräzipitaten oder im Skorodit $[\text{Fe}(\text{AsO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ fixiert (HAUBRICH et al. 2000; TICHOMIROVA et al. 2003).

Al, Mg und K werden vorrangig aus Biotit sowie aus K-Feldspat und Plagioklas aus dem Nebengestein und Versatzmaterial (Freiberger Gneis) freigesetzt, wobei dieser Prozess bei niedrigen pH-Werten verstärkt abläuft. Kalium kann bei der Bildung von Jarosit $[(\text{K}, \text{Pb})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ und Illit größtenteils wieder festgelegt werden (HAUBRICH et al. 2000; TICHOMIROVA et al. 2003).

Neben diesen für die meisten Probenahmekampagnen erkennbaren Trends der Freisetzung und Fixierung zeigen einige Elemente zu bestimmten Zeiten deutlich anomale Werte, die sich von der Stollnsohle bis zur $\frac{1}{2}$ 3.Sohle verfolgen lassen; dies sind für Ca ungewöhnlich niedrige Konzentrationen (z.T. nur 50 % der sonst gemessenen Werte) für die Probenahmen am 24.05.00 sowie am 7.12.00. Cl zeigt erhöhte Konzentrationen auf allen drei Sohlen für die Probenahme am 29.04.02. Für die Probenahme am 11.04.00 können auf der Stollnsohle erhöhte Konzentrationen für Fe und As und niedrigere Konzentrationen für Na beobachtet werden. Zur Beprobung am 11.02.02 wurden ebenfalls niedrigere Na- und K-Konzentrationen gemessen. Wahrscheinlich können diese anomalen Werte auf eine andere Zusammensetzung des Grund- /Sickerwassers an diesen Messtagen zurückgeführt werden.

4 S- und O-Isotopenzusammensetzung des Grubenwassers

BAACKE (2000) und HAUBRICH & TICHOMIROVA (2002) interpretieren eine mit der Tiefe steigende Mineralisation des Grubenwassers auf dem Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“ als Ergebnis der Mischung mit hochmineralisierten, sulfatreichen Lösungen. Diese Interpretation konnte durch eigene Ergebnisse bestätigt werden. HAUBRICH & TICHOMIROVA (2002) haben gezeigt, dass die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte mit der Tiefe sinken. Sie geben die Schwefelisotopenwerte als Maß für das aus der Sulfidoxidation resultierende Sulfat an. Steigende Sulfatkonzentrationen und sinkende $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werte der Gru-

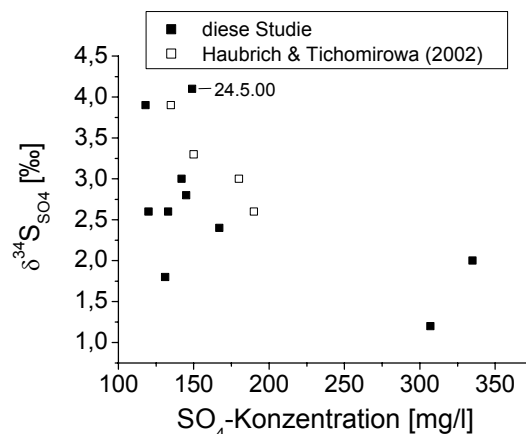


Abb. 2: Zusammenhang zwischen dem $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Wert und der Sulfatkonzentration (1. Sohle).

benwässer wurden als Indiz für eine erhöhte Zumischung von hochmineralisierten Wässern durch Sulfidoxidation gedeutet. Demzufolge wurde eine Abhängigkeit beider Parameter voneinander für die drei Tiefenniveaus vermutet. Allerdings konnte nur für die 1. Sohle näherungsweise eine Abhängigkeit beobachtet werden (Abb. 2). Neben eigenen Messungen wurden in Abbildung 2 zum Vergleich Daten von Beprobungen im Jahr 1997 aus HAUBRICH & TICHOMIROVA (2002) ergänzt.

Eine deutlich bessere Korrelation zeichnet sich zwischen $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ und der Sulfatfracht für die 1.Sohle ab (Abb. 3b), wobei zwei Probenahmen starke Abweichungen vom beobachteten Trend zeigen (11.4.00 und 24.5.00), die schon auf der Stollnsohle (mit Ausnahme des $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Wertes am 11.4.00) erkennbar sind (Abb. 3a). Diese beiden Probenahmezeitpunkte sind ebenfalls durch anomale Konzentrationen einiger Elemente gekennzeichnet (11.4.00: Na, SO₄, K, Fe, As; 24.5.00: Ca). Die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werte für die 1. Sohle zeigen neben abweichenden Werten, wie sie für $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ beobachtet wurden, stärkere Schwankungen. Wir vermuten eine zusätzliche anthropogene Sulfatquelle im Sicker- bzw. Grundwasser, die diese Abweichungen hervorruft. Es ist bemerkenswert, dass nicht alle anomalen Anionen- bzw. Kationenkonzentrationen ebenfalls anomale Isotopenwerte zur Folge haben. Es scheint jedoch, dass $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werte generell stärker auf eine Änderung des geochemischen Milieus (durch anthropogene Quellen bzw. Redoxreaktionen) reagieren als $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte.

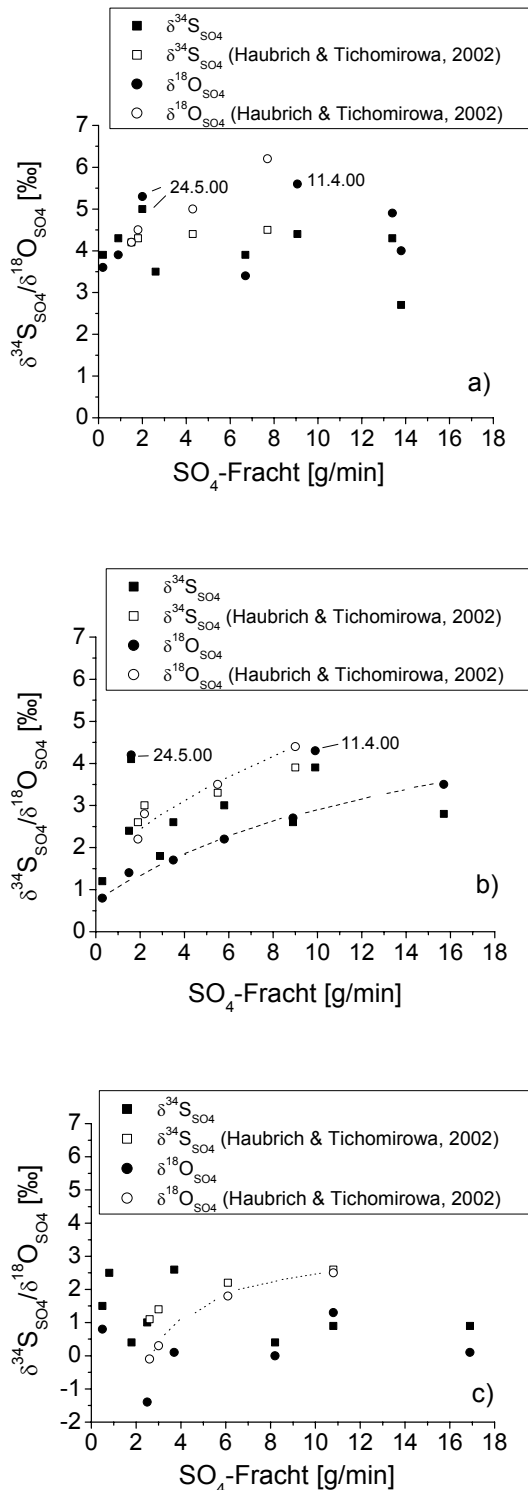


Abb. 3: Zusammenhang zwischen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten und der Sulfatfracht auf den drei Sohlen.

Für die ½ 3. Sohle weisen die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte von HAUBRICH & TICHOMIROWA (2002) für 1997 eine positive Abhängigkeit von der Sulfatfracht auf, die jedoch durch zusätzliche

Daten nicht bestätigt werden konnte (Abb. 3c). Generell höhere Sulfatkonzentrationen und niedrigere $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte sowie niedrigere pH-Werte weisen auf einen höheren Anteil an Porenwässern mit einer höheren Verweilzeit der Grubenwässer für unsere Probenahmeekampagne 2000–2002 hin. Wahrscheinlich führen Austausch-, Fixierungs- und Verdunstungsprozesse sowie zeitweiliges Austrocknen der Verwitterungsmatrix zu stärkeren Streuungen der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte

Den Zusammenhang zwischen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten und der Wassermenge auf der 1. Sohle zeigt Abbildung 4. Mit steigender Wasserdurchflussmenge steigen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Wert an, was auf eine verstärkte Zumischung von Grund- bzw. Bodensickerwasser bei höherem Wasserangebot (Schneeschnitz, Starkniederschlagsereignisse) zurückzuführen ist. Der Anteil der hochmineralisierten Porenlösungen nimmt somit bei hohem Durchfluss immer mehr ab.

Ein Vergleich mit den Daten aus HAUBRICH & TICHOMIROWA (2002) zeigt, dass 1997 sowohl höhere $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - als auch höhere $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte gemessen wurden, wobei die größeren Differenzen mit bis zu 1,7 ‰ für $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ beobachtet werden (Abb. 3b, Abb. 4a und b). Die arithmetischen Mittelwerte der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte auf der Stollnsohle von HAUBRICH & TICHOMIROWA (2002) ergeben 4,4 ‰ bzw. 5,0 ‰. Im Vergleich dazu liegen die Mittelwerte der nachfolgenden Beprobungen (4/2000–7/2002) bei 4,0 ‰ bzw. 4,1 ‰. Es ist somit schon auf der Stollnsohle ein deutliches Absinken des $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Wertes zu verzeichnen. Dies kann möglicherweise auf eine Infiltration von Niederschlagswasser mit niedrigeren $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten zurückzuführen sein. Neuere Isotopenmessungen (10/2000–1/2002) an Niederschlägen in Freiberg deuten ein leichtes Absinken des $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Wertes im Vergleich zu 1997 an. Zur zeitlichen Veränderung der $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte im Niederschlag kann keine Aussage getroffen werden, da keine aktuellen Messdaten für $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ vorliegen.

Es wurde versucht, anhand der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte der Grubenwässer den Anteil des Sulfates abzuschätzen, der aus der Sulfidoxidation abzuleiten ist. $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte auf der Stollnsohle zeigen keine Abhängigkeit von der Wassermenge und der Sulfatfracht, was die Annahme bestätigt, dass es sich hierbei um ein von Sulfidoxidationsprozessen relativ unbeein-

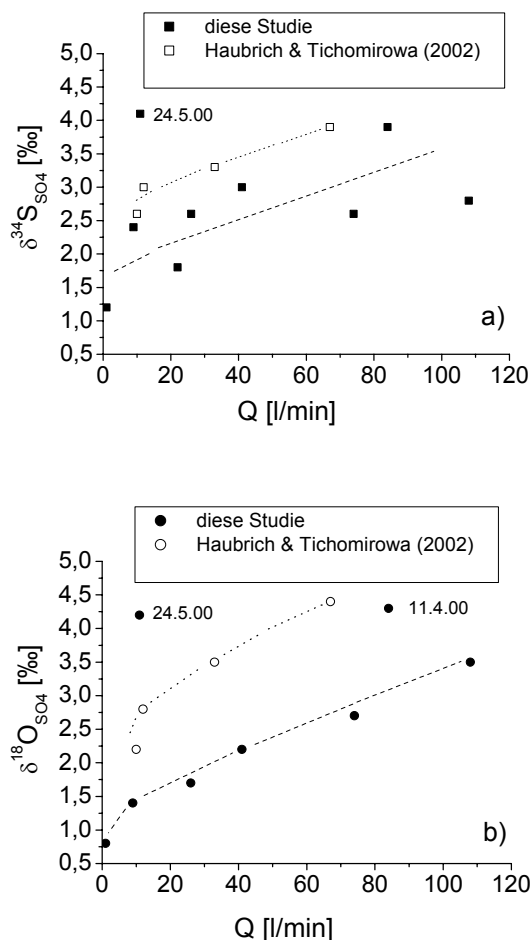


Abb. 4: Zusammenhang zwischen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten und der Wassermenge auf der 1. Sohle.

flusstes Wasser handelt. Demzufolge können die mittleren $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - (3,9 ‰) und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ - Werte (3,8 ‰) dieser Wässer (mit Ausnahme der Beprobungen vom 11.4.00 und vom 24.5.00) zur Charakterisierung des Grund- und Bodensickerwassers verwendet werden, welches noch keinen Einfluss von Sulfidoxidaionsprozessen aufweist. Die zweite Sulfatquelle stellen die hochmineralisierten Porenlösungen der Verwitterungsmatrix in den Abbauen dar. Diese können z.T. stark variierende $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ (-2,8 bis -0,3 ‰) und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte (-10,0 bis -2,0 ‰) aufweisen (HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002; TICHOMIROWA et al. 2003). Für weitere Berechnungen wurde deshalb der Mittelwert aller Werte für hochmineralisierte Porenlösungen aus HAUBRICH & TICHOMIROWA (2002) und TICHOMIROWA et al. (2003) verwendet. Demzufolge ist das Endglied „hochmineralisierte Porenlösung“ durch einen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Wert von -1,6 ‰ und einen $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ von -5,7 ‰ charakterisiert.

Mittels der Isotopenwerte der beiden Endglieder (Grund- und Bodensickerwasser, hochmineralisierte Porenlösung) wurde der Anteil des Porenwassersulfats im Grubenwasser auf der 1. und ½ 3. Sohle abgeschätzt.

Der Anteil des Porenwassersulfats liegt für die 1.Sohle zwischen 16 % und 48 % (Mittelwert 29 %) nach einer Abschätzung mittels $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ und zwischen 3 % und 50 % (Mittelwert 23 %) mittels $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$. Für die ½ 3. Sohle wurden 23 % bis 62 % mit einem Mittelwert von 50 % nach $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werten und 27 % bis 54 % (Mittelwert 41 %) nach $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten berechnet.

Die Berechnungen ergeben z.T. recht gute Übereinstimmungen auf der 1. Sohle für Sulfatanteile, die aus hochmineralisierten Porenlösungen stammen. Die größten Differenzen ergeben sich für die Probenahmen am 15.3.01 und 11.2.02, für die die höchsten Wassermengen im gesamten Beprobungszeitraum gemessen wurden. Die berechneten Anteile auf der ½ 3. Sohle zeigen eine weniger gute Übereinstimmung im Vergleich zur 1.Sohle, was die stärkere Streuung der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte widerspiegelt. Die aus den Daten von 1997 (HAUBRICH & TICHOMIROWA 2002) ermittelten Anteile sind für ähnliche Wasserdurchflussmengen mit denen neuerer Beprobungen vergleichbar.

Im Vergleich zu den hier berechneten Anteilen des Sulfats aus den Porenlösungen am Grubenwasser werden bei BAACKE (2000) Durchschnittswerte der Elementmobilisation durch Sulfidverwitterung für das Jahr 1997 für den gesamten durchflossenen Abbau (Stollnsohle bis ½ 3. Sohle) von ca. 85 bis 95 % für Cd, Cu, Fe, Mn, Pb und Zn angegeben. Dagegen tragen die Abbaue lediglich mit 23 % zur As und Ni-Fracht bei.

Zur Abschätzung der Intensität der Sulfidoxidation können als geochemische Tracer die Sulfatgehalte zur Anwendung kommen. Nachteilig für Sulfat als Indikator wirkt sich die Bildung von sulfathaltigen Sekundärmineralen und somit eine teilweise Fixierung von Sulfat aus. Zn, das aufgrund seiner hohen Mobilität als ein weiterer Indikator dienen kann, wird jedoch lediglich bei der Sphaleritoxidation freigesetzt und berücksichtigt nicht die Anteile aus Galenit, Pyrit und Arsenopyrit. Wir glauben, dass mittels $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werten eine realistischere Einschätzung des zeitlichen Verlaufs der Sulfidverwitterung vorgenommen werden kann, da Fixierungsprozesse zu keinen oder nur unwesentlichen Fraktionierungen führen und Zumischungen

Tab. 1: Prozentualer Anteil des Porenwassersulfats am Grubenwassersulfat auf der 1. und ½ 3. Sohle.

Probenah- medatum	Anteil des Sulfats des hochmineralisierten Porenwassers aus der Sulfidoxidation am Grubenwassersulfat [%]			
	1. Sohle		½ 3. Sohle	
	Berechnung mittels $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$	Berechnung mittels $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$	Berechnung mittels $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$	Berechnung mittels $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$
23.4.97*	8	6	30	24
31.7.97*	18	14	37	30
19.9.97*	23	21	50	45
13.10.97*	30	26	54	48
07.12.00	48	32	43	32
16.01.01	34	50	50	53
15.03.01	20	3	53	39
24.07.01	27	26	52	56
22.11.01	16	17	62	40
15.01.02	23	22	23	39
11.02.02	23	12	53	27
29.04.02	38	n.b.	62	n.b.
Mittelwert (ohne *)	29	23	50	41

* Daten aus HAUBRICH & TICHOMIROWA (2002)

weiterer Quellen deutlich anhand abweichender Isotopensignaturen erkannt werden können.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen an dem abgebauten Erzgang „Schwarzer Hirsch Stehender“ konnte festgestellt werden, dass Wässer, die anomale Isotopenwerte zeigen, ebenfalls anomale Elementkonzentrationen aufweisen. Diese könnten durch eine zusätzliche (anthropogene) Sulfatquelle verursacht worden sein.

$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Isotopenverhältnisse auf der 1. Sohle zeigen an, dass der Anteil der hochmineralisierten Porenlösungen auch bei hohem Durchfluss immer mehr abnimmt. Im Vergleich zu 1997 gewonnenen Isotopendaten ist ein Absinken der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte zu beobachten, was möglicherweise auf eine Infiltration von isotopisch leichteren Niederschlagswässern zurückzuführen sein kann.

Anhand von $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ wurde der Anteil des Porenwassersulfats am Grubenwasser berechnet. Dieser liegt zwischen 3 und 50 % auf der 1. Sohle und 23 % und 62 % auf der ½ 3. Sohle.

In den Abbauen der ½ 3. Sohle spielen bei deutlich geringeren Wassermengen möglicherweise Austausch-, Fixierungs- und Verdunstungsprozesse sowie möglicherweise zeitweises Aus-

trocknen der Verwitterungsmatrix eine Rolle, die zu stärkeren Streuungen der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte führen.

Literatur

- BAACKE, D. (2000): Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube "Himmelfahrt" in Freiberg/Sachsen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg. 139 S.
- BAUMANN, L., KUSCHKA, E., SEIFERT, T. (2000): Die Lagerstätten des Erzgebirges. Enke Verlag. 300 S.
- HAUBRICH, F. & TICHOMIROWA, M. (2002): Sulfur and oxygen isotope geochemistry of acid mine drainage – the polymetallic sulfide deposit "Himmelfahrt Fundgrube" in Freiberg (Germany). – Isotopes in Environmental and Health Studies, vol. 38 (2). S.121–138.
- HAUBRICH, F., BAACKE, D., KLUGE, A., KINDERMANN, A. & WINKLER, C. (2000): Sulfidverwitterung in aufgefahnen Erzgängen – ein Feld komplexer geochemischer, mineralogischer und mikrobiologischer Forschung. In: WIPPERMANN, T. (Hrsg.): Bergbau und Umwelt – langfristige geochemische Einflüsse. GUG-Schriftenreihe Geowissenschaften und Umwelt Bd. 5. Springer-Verlag, Hannover. S. 57–66.

- TICHOMIROWA, M., PELKNER, S., JUNGHANS, M. & HAUBRICH, F. (2003): Sulfide oxidation in acid mine drainage: relationship between precipitated and dissolved sulfates at the polymetallic sulfide deposit Freiberg (Germany) and consequences for mobilisation of heavy metals. Wiley (angenommen)
- WINKLER, C. (1998): Verfolgung des vertikalen Migrationsweges und Bilanzierung ausgewählter Elemente entlang der mineralisierten Gangzone des „Schwarzen Hirsch Stehenden Nord“. Unveröffentl. Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg. 127 S.
- WINKLER, C., BAACKE, D., KLUGE, A. & BEUGE, P. (2000): Geochemische und hydrogeologische Untersuchungen im Ausbissbereich eines Erzganges im Hinblick auf die Elementmigration – eine interdisziplinäre Aufgabenstellung. In: WIPPERMANN, T. (Hrsg.): Bergbau und Umwelt – langfristige geochemische Einflüsse. GUG-Schriftenreihe Geowissenschaften und Umwelt Bd. 5. Springer-Verlag, Hannover. S. 151–161.