

# Wasserchemie der Erbstollenwässer im südlichen Ruhrgebiet

Frank Wisotzky (Bochum)

## Zusammenfassung

Die Wasserzusammensetzung von 13 Erbstollenwässern im südlichen Ruhrgebiet wird dargestellt. Es wird die typische Zusammensetzung der untersuchten Wässer in Tabellenform (vier Einzelanalysen und Min- Max-Werte) beschrieben. Zusätzlich erfolgt eine kurze Charakterisierung der vier nachfolgend genauer dargestellten Erbstollen (Franziska Erbstollen, St. Johannes Erbstollen, Schlebuscher Erbstollen und Vereinigungsstollen, alle liegen im Ennepe-Ruhr-Kreis). Anschließend wird eine abschätzende inverse Modellierung der Erbstollenwässer ausgehend von Regenwasser oder gering mineralisiertem Wasser des Christiesper Erbstollens dargestellt. Aufbauend erfolgt eine Vorwärtsmodellierung bei der eine Calcit- und Dolomitlösung, eine Lösung von Pyrit und Halit, eine Lösung von Sauerstoff und Kohlendioxid sowie eine Ausfällung von Eisen(III)-Hydroxid berechnet werden. Diese Reaktionen scheinen die Wasserchemie der untersuchten Erbstollenwässer zu prägen wobei einschränkend zu sagen ist, dass nicht alle Kennwerte vollständig nachmodelliert werden können.

Schlagwörter: Wasserchemie, Erbstollenwässer, Calcitlösung, Dolomitlösung, Pyrit, Halit, Modellierung

DOI: 10.3243/kwe2018.01.003

## Abstract

### Water Chemistry of the Main Adit Level Waters in the Southern Ruhr Area

Presented here is the composition of the water from 13 main adit level waters in the southern Ruhr area. The typical composition of the water investigated is described in tabular form (four individual analyses and min-max. values). In addition, a short characterisation of the four following more precisely presented main adit levels (Franziska main adit level, St. Johannes main adit level, Schlebuscher main adit level and Vereinigungs adit, all situated in the Ennepe-Ruhr district). Subsequently, a speculative, inverse modelling of the main adit level waters, based on stormwater or slightly mineralized water of the Christiesper main adit level is presented. Building on this, a forward modelling takes place with which a calcite and dolomite solution, a solution of pyrite and halite, a solution of oxygen and carbon dioxide as well as a precipitation of ferric hydroxide are calculated. These reactions appear to characterise the water chemistry of the main adit level waters investigated, whereby this is to be qualified in that not all characteristics could be modelled completely.

Key words: water chemistry, main adit level waters, calcite solution, dolomite solution, pyrite, halite, modelling

## Einführung

Der frühe Steinkohlenbergbau im Ruhrgebiet kam nach dem Ende des Pingenbergbaues meist noch ohne den Einsatz von Pumpen zur Entwässerung der Bergwerke aus. Dazu wurden aus dem Bereich der Vorfluter (z. B. dem Ruhrtal) flach ansteigende Stollen in das Steinkohlengebirge vorgetrieben. Diese Entwässerungs- und Bewetterungsstollen werden als Erbstollen bezeichnet [1]. Die Stollen unterfahren die angeschlossenen Bergwerke und führen damit zur Grundwasserabsenkung im Gewinnungsbereich („Stollenbergbau mit Erbstollen“; Abbildung 1).

Mit der Einführung der Dampfmaschine war eine Entwässerung nun auch unterhalb des Vorflutniveaus der ableitenden Gewässer in größeren Umfang möglich. Dies markiert den Übergang vom Stollenbergbau in den „Tiefbau“ [2]. Heute erfolgt die Entwässerung der verbliebenen Schachtanlagen sowie des „Stillstandsbereiches“ der Bergwerke im Ruhrgebiet über

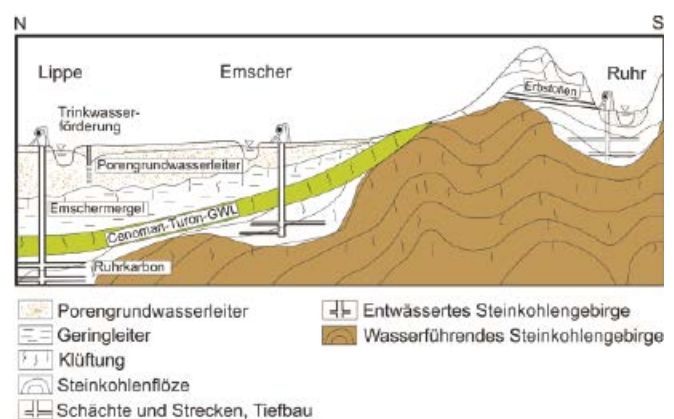


Abb. 1: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch das Ruhrgebiet mit Erbstollen im Bereich der Ruhr

Elektropumpen (Abbildung 1). Aktuell werden dazu rd. 60 Mio. m<sup>3</sup> Wasser gehoben und in die Vorfluter Ruhr, Emscher, Lippe und Rhein abgeleitet [3]. Die Hydrochemie dieser ehemaligen und tätigen Schachtanlagen des Ruhrgebiets wird in [4] detailliert dargestellt.

Durch den Stollenbergbau ist für das südliche Ruhrgebiet eine Gesamtzahl von ca. 50 Stollen und Erbstollen beschrieben, die zum Teil wasserführend sind [5]. Ziel der hier vorgestellten Untersuchung war es, die Wasserchemie typischer Erbstollenwässer im südlichen Ruhrgebiet erstmalig zusammenhängend zu charakterisieren. Dazu wurden insgesamt 13 Erbstollenwässer im südlichen Ruhrgebiet beprobt. Neben der Darstellung der Wasserchemie zielte eine hydrogeochemische Modellierung auf eine Nachbildung der Wasserchemie, um ablaufende Prozesse, die die Wasserqualität prägen, abschätzend zu identifizieren.

## Methodik

Im Rahmen eines Ausbildungsprojektes wurden ausgesuchte Erbstollen des südlichen Ruhrgebiets hydrogeochemisch untersucht. Die Beprobung erfolgte dabei nach Austritt der Grubenwässer am Stollenmundloch. Zur Untersuchung wurden Schöpfproben der austretenden Wässer genutzt [6]. Insgesamt wurden 13 Erbstollenwässer beprobt (Stephansburger Erbstollen, Sonnenscheiner Erbstollen, Treue tiefer Stollen, Vereinigte Pflingstblume alle in Bochum; St. Johannes Erbstollen, Franziska Erbstollen, Braunschweiger Südflügel, Vereinigungsstollen alle in Witten; Christsieper Erbstollen, Stollen von Geduld, Herzkämper Erbstollen, Neuer Scheller Stollen, Schlebuscher Erbstollen alle im Ennepe-Ruhr-Kreis).

Im Gelände erfolgte eine Messung des pH-Wertes, der Temperatur, der elektrischen Leitfähigkeit sowie zum Teil der orga-

noleptischen Parameter Geruch, Farbe und Trübung. Zur Bestimmung der Kohlendioxidspezies wurden zwei 250 ml Glasflaschen blasenfrei befüllt und im Labor die Titrationen die Säurekapazität bis pH 4,3 (KS<sub>4,3</sub>) sowie der Basenkapazität bis pH 8,2 (KB<sub>8,2</sub>) durchgeführt [nach 7]. Die Calcitlösekapazität wurde in Anlehnung an die DIN 38404-10 [8] aus dem mH-Wert (HEYER-Versuch) und dem KS<sub>4,3</sub> in den Einheiten mmol/l durch die folgende Formel berechnet ( $D=0,5(mH - KS_{4,3})$ ; [9]).

Zur Messung von Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium wurde die Ionenchromatographie eingesetzt (DIONEX, DX 500, Säule CS12A). Für die Messung dieser Kationen wurden die Proben in 50 ml PE-Flaschen überführt und mit 0,5 ml Salpetersäure zur Verhinderung von Ausfällungen angesäuert. Die Messung erfolgte nach DIN ISO 14911 [10]. Die Eisenbestimmung erfolgte durch Messung an der AAS (Varian, AA 240 FS). Für die Messung von Chlorid, Sulfat und Nitrat wurden ca. 50 ml Probewasser in eine PE-Flasche überführt und mit Hilfe der Anionenchromatographie (DIONEX, ICS-1000, Säule AS14A) nach [11] gemessen.

Mit dem hydrogeochemischen Programm PHREEQC [12] wurden die Sättigungsindizes für verschiedene Mineralphasen sowie der CO<sub>2</sub>-Partialdruck aus den ermittelten Kennwerten berechnet (Tabelle 1). Analog gingen [13] zur Beschreibung der Grubenwässer der oberbayerischen Pechkohlenmulde vor. In [9] wird dies standardmäßig für die dargestellten Wasseranalysen verwendet. Anschließend erfolgte eine Modellierung zur Entstehung und Nachbildung der beobachteten Wasserchemie der Erbstollenwässer im südlichen Ruhrgebiet. Dazu wurden zwei inverse Modellierungen mit dem Programm PHREEQC realisiert. Als Ausgangswasser wurden entweder kontinentaler Regen [14] oder ein schwach mineralisiertes Erbstollenwasser des beprobten Christsieper Erbstol-

	Franziska Erbstollen	St. Johannes Erbstollen	Schlebuscher Erbstollen	Vereinigungsstollen	Min-Max-Werte
pH	6,7	6,5	6,5	6,7	6,4-7,4
Temperatur (°C)	14,5	11,9	11,0	11,0	6,1-14,5
El. Leitf. (μS/cm)	1432	732	603	694	244-1432
Geruch	H <sub>2</sub> S	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	87,2	75,3	47,5	53,5	20-87,2
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	34,0	35,0	23,7	30,9	8,1-35,0
Na <sup>+</sup> (mg/l)	175,0	11,5	32,2	36,2	7,0-175
K <sup>+</sup> (mg/l)	14,0	5,9	7,3	7,1	2,0-14,0
Fe <sub>ges.</sub> (mg/l)	3,3	2,2	0,1	<0,1	<0,1-5,2
Mn <sub>ges.</sub> (mg/l)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	56	19,9	28,6	22,0	14,6-74,6
CO <sub>2ges.</sub> (mg/l)	434,7	161,9	192,7	157,5	54,6-434,7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	278	232	88,1	175	39,6-278
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	549	187,9	221,5	191	63,5-549
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	<0,2	5,3	4,8	19,2	<0,2-20,2
SI Calcit (-)	-0,5	-1,3	-1,3	-1,1	-2,1 bis -0,4
PCO <sub>2</sub> (Vol.-%)	6,6	3,2	3,7	2,3	0,24-6,6

Tabelle 1: Darstellung der Zusammensetzung von ausgewählten Erbstollenwässern des südlichen Ruhrgebietes (Analysen von April 2010) sowie die bestimmten Minimal- und Maximalwerte der 13 untersuchten Erbstollenwässer



Abb. 2: Grundwasseraustritte des Franziska-Erbstollens (links) und St. Johannes-Erbstollens (rechts) in Witten (Fotos: Wisotzky)

lens genutzt (Wasserzusammensetzung: pH 6,6; el. Leitfähigkeit  $244 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; Temp.  $8,8^\circ\text{C}$ ;  $\text{Na}^+$   $7 \text{ mg/l}$ ;  $\text{K}^+$   $2,1 \text{ mg/l}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$   $8,1 \text{ mg/l}$ ;  $\text{Ca}^{2+}$   $20 \text{ mg/l}$ ;  $\text{Fe}^{2+}$   $0,16 \text{ mg/l}$ ;  $\text{Cl}^-$   $14,6 \text{ mg/l}$ ;  $\text{NO}_3^-$   $12 \text{ mg/l}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$   $39,6 \text{ mg/l}$ ;  $\text{HCO}_3^-$   $63,5 \text{ mg/l}$ ). Als finale Wasserzusammensetzung wurde die Wasserzusammensetzung des Franziska Erbstollens gewählt (Zusammensetzung siehe Tabelle 1). Das Programm versucht aus der Ausgangslösung die vorgegebene Endlösung unter Nutzung der angegebenen Mineralphasen bzw. Gasphasen zu erzeugen. Die aufgrund der Massenbilanzen möglichen Modelle und Phasenumsätze werden als Ergebnis dargestellt. Die Berechnung war nur mit einer großen Unsicherheit in beiden Fällen möglich („uncertainty 0,2 bzw. 0,38“ bei den meisten Inhaltsstoffen), was auf eine Näherungslösung hinweist. Als reagierende Mineral- und Gasphasen wurden Calcit, Pyrit, Halit,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  für die Berechnung genutzt. Aufgrund der großen Unsicherheit kann das Ergebnis nur zur abschätzenden Ersteinstufung genutzt werden. Inverse Modellierungen werden in [15] so-

wie im Handbuch des Programmes PHREEQC [12] grundsätzlich beschrieben. Einige Beispiele zur inversen Modellierung werden in [16] dargestellt. Der Einsatz in einem Abraumpengrundwasserleiter der Braunkohlegewinnung wird in [17] und in [18] dargestellt. Lecomte et al. [19] nutzen die inverse Modellierung zur Nachbildung der Wasserchemie in Tiefengesteinen in Argentinien. Sharif et al. [20] untersuchen die Arsenmobilität in einem Terrassengrundwasserleiter u. A. durch inverse Modellierung.

In einem weiteren Modellerschritt wurde eine Vorwärtsmodellierung mit kontinentalen Regenwasser als Startlösung realisiert. An den Reaktionen beteiligt waren, Sauerstoff, Kohlendioxid, Calcit und Dolomit sowie Halit, Pyrit und Eisen(III)-Hydroxid. Als Zielwasser wegen der starken Mineralisierung wurde das Erbstollenwasser des Franziska Erbstollens sowie das Wasser des Schlebuscher Erbstollens wegen seiner Länge und damit Repräsentanz genutzt (Tabelle 1). Bei genügend guter Annäherung wurde die händische Vorwärtsmodellierung beendet. Als Ergebnis werden die erzeugten Phasenumsätze dargestellt. Der Einsatz der Vorwärtsmodellierung in der Wasseraufbereitung wird von [21] beschrieben. Für Braunkohleabraumkippen stellen dies [18] dar.

### Beschreibung der beprobten Erbstollen

Insgesamt 13 Erbstollenwässer des südlichen Ruhrgebietes wurden beprobt und die austretenden Grubenwässer hydrochemisch untersucht. Die erzielten Ergebnisse ausgesuchter Wasserproben werden in der Tabelle 1 dargestellt. Dies sind der Franziska Erbstollen, der St. Johannes Erbstollen, der Schlebuscher Erbstollen sowie der Vereinigungsstollen. Diese werden nachfolgend einzeln kurz beschrieben.

Der Franziska Erbstollen liegt in der Stadt Witten (Ennepe-Ruhr-Kreis). Er besitzt eine Gesamtlänge von ca. 4 km. Er war der wichtigste Erbstollen für den Wittener Steinkohlenbergbau und wurde 1772 begonnen [22]. Er führt bis heute eisenhaltiges Grubenwasser und entwässert über den Mühlengraben in die Ruhr (siehe Abbildung 2, links).

Der St. Johannes Erbstollen liegt auch auf Wittener Stadtgebiet (Ennepe-Ruhr-Kreis). Das gesamte Stollensystem inklusive der Flügelörter hatte eine Gesamtlänge von mehr als 8,5 km [23]. In der geologischen Karte von Bochum ist der St. Johannes Erbstollen im Profil dargestellt [24]. Das ausfließende Wasser ist eisenhaltig und färbt die Umgebung des Austrittes durch Ausfällung von Eisen(III)-Hydroxid rot vor Eintritt in die Ruhr (siehe Abbildung 2, rechts).

Neben diesen Erbstollen in Witten wurde der Schlebuscher Erbstollen in Wetter beprobt. Er ist mit einer Länge von ca. 15 km der längste Erbstollen des Ruhrgebietes [2]. Mit dem Bau wurde ca. 1760 begonnen. Der Schlebuscher Erbstollen entwässert eine Fläche von ca.  $36 \text{ km}^2$ . Er beginnt in Wetter-Wengern (Ennepe-Ruhr-Kreis) im Ruhrtal und verläuft in südwestlicher Richtung leicht ansteigend bis in den Bereich von Haßlinghausen (Stadt Sprockhövel im Ennepe-Ruhr-Kreis). In ihm werden Tropfsteine aus Eisenoxid beobachtet [2].

Neben diesen großen Erbstollen im südlichen Ruhrgebiet wurde auch das Grubenwasser des Vereinigungsstollens (Witten, Ennepe-Ruhr-Kreis) untersucht und dargestellt. Der vergleichsweise kleine Stollen erreichte eine Länge von 375 m [5] und entwässert ebenfalls in die Ruhr. Neben der Wasserhaltung und Bewetterung diente der Stollen auch dem Kohletransport.

Anzeige

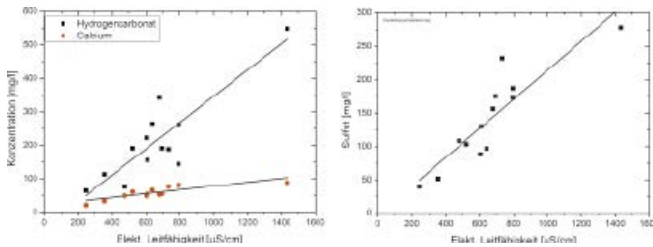


Abb. 3: Abhängigkeit der Calcium- und Hydrogencarbonatkonzentrationen (links) bzw. Sulfatkonzentration (rechts) mit der elektrischen Leitfähigkeit

Eine Eisenfällung ist im Gegensatz zu den oben dargestellten Erbstollen am Stollenmundloch nicht erkennbar.

## Ergebnisse und Diskussion

Eine Literaturrecherche zeigte, dass die oberkarbonischen Gesteine in Form von Waschbergen aus der Kohleaufbereitung, Tonminerale (Illit, Kaolinit, Chlorit) sowie Feldspat, Quarz, Siderit, Dolomit, Calcit und Pyrit enthalten [25]. Diese primären Minerale können folglich bei der Modellierung zur Berechnung der Erbstollenwässer grundsätzlich genutzt werden (siehe unten). Die bestimmte Grubenwasserchemie der oben beschriebenen Erbstollen wird in der Tabelle 1 dargestellt und ist aufgrund der beschriebenen großen Längen der Erbstollen (betr. Franziska Erbstollen, St. Johannes Erbstollen und Schlebuscher Erbstollen) als charakteristisch für das Untersuchungsgebiet anzusehen. Zusätzlich wird durch Darstellung der Minimal- und Maximalwerte auch die Spannweite in den untersuchten Erbstollenwässern in der Tabelle 1 dargestellt.

Die Grubenwässer sind mit einem pH-Wert zwischen von 6,4 bis 7,4 als schwach sauer bis neutral einzustufen. Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeit bezogen auf 25 °C sind typisch für oberflächennahes Grundwasser und liegen zwischen ca. 240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und ca. 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Die gemessene Temperatur ist meist mit Werten zwischen 11 und 12 °C (Aprilwerte) typisch für oberflächennahes Grundwasser [9]. Eine schwach erhöhte Temperatur von 14,5 °C wurde im Grubenwasser des Franziska Erbstollens gemessen (Tabelle 1), was auf den Eintrag von Tiefengrundwasser hinweist. Niedrigere Temperaturen bis minimal 6,1 °C (Sonnenscheiner Erbstollen) wurden vereinzelt gemessen. Die dominanten Kationen sind meist Calcium, Magnesium und Natrium. Häufig gemessene höhere Magnesiumkonzentrationen weisen auf die Lösung von Dolomit oder magnesiumhaltigen Silikaten hin (Tabelle 1). Die Grubenwässer sind überwiegend eisenhaltig, was auf die Oxidation von Sulfidmineralen wie Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) oder die Lösung von Ei-

senkarbonat (Siderit,  $\text{FeCO}_3$ ) im Steinkohlengebirge hinweist. Die maximal gemessene Eisenkonzentration liegt bei ca. 5 mg/l. Da die Wässer mit Luftsauerstoff in Kontakt kommen, erfolgt eine Teilausfällung des Eisens. Die dabei freigesetzte Azidität wird wahrscheinlich durch die Lösung von Karbonatmineralen bzw. durch die Reaktion mit Hydrogencarbonat überwiegend neutralisiert. Die Wässer sind dennoch mit negativen SI-Werten für Calcit immer durch eine Untersättigung für dieses Mineral gekennzeichnet (Tabelle 1). Wedewardt [4] beschreibt einen Karbonatanteil von 0,22 Gew. % in einer Sandsteinprobe bzw. 1,83 Gew. % in einer Sandschieferprobe des Oberkarbons und belegt damit die Anwesenheit von Karbonatmineralen in den Gesteinen des Oberkarbons. Die Sulfatkonzentrationen weisen mit Werten bis zu ca. 280 mg/l ebenso auf eine Freisetzung durch Sulfid-/Pyritoxidation hin. In den dargestellten Wässer der Tabelle 1 sind wahrscheinlich durch die Lösung von Karbonatmineralen oder  $\text{CO}_2$ -Eintrag hohe  $\text{CO}_2$ -Partialdrucke ( $\text{PCO}_2$ ) bis zu 6,6 Vol. % und zum Teil hohe Hydrogencarbonatkonzentrationen bis zu ca. 550 mg/l zu finden.

Die Abbildung 2 zeigt Fotos der aus Erbstollen austretenden Grubenwässer in Witten. Aufgrund der Eisenbelüftung, -oxidation und -ausfällung ist das Gewässerbett durch rote Eisenbelege sowohl am Franziska Erbstollen wie auch am St. Johannes Erbstollen gekennzeichnet.

In den beprobten Erbstollenwässern wird ein positiver Zusammenhang der Calciumkonzentration ( $R^2 = 0,67$ ), der Hydrogencarbonatkonzentration ( $R^2 = 0,74$ ) und der Sulfatkonzentration ( $R^2 = 0,78$ ) mit der elektrischen Leitfähigkeit beobachtet (Abbildung 3). Die höher mineralisierten Wässer sind bei zunehmenden elektrischen Leitfähigkeiten damit vor allem durch eine Zunahme der Calcium-, Hydrogencarbonat- und Sulfatkonzentrationen geprägt.

Mit Hilfe des Programmes PHREEQC wurde eine inverse Modellierung der Phasenumsätze durchgeführt. Als Ausgangslösung wurden entweder Regenwasser und oder schwach mineralisiertes Erbstollenwasser (Christsieper Erbstollen) genutzt (Tabelle 2).

Bei den beiden Berechnungen wurde übereinstimmend eine Lösung von Calcit, Pyrit, Halit,  $\text{CO}_2$  und Sauerstoff berechnet (Tabelle 2). Der Sauerstoff wurde zur Oxidation von Pyritschwefel und zweiwertigem Eisen aus dem Pyrit verwendet. Der größte Teil des Eisens wurde nachfolgend durch eine Ausfällung des Eisen(III)-Hydroxids dem Wasser entzogen. Anhand der Modellierung kann ein ausgefällter Gehalt an Eisen(III)-Hydroxids von ca. 0,5 bis zur 1,2 mmol/l angenommen werden (Tabelle 3). Die bei diesen Reaktionen freigesetzte Acidität wird durch die Lösung von Karbonatmineralen (z. B. Calcit) bzw. aus dem daraus freigesetzten Hydrogencarbonat

Umsatz/Ausgangslösung	Regenwasser	Christsieper Erbstollen
Calcit [mmol/l]	3,82	3,34
Pyrit [mmol/l]	0,57	0,37
Halit [mmol/l]	2,26	1,77
$\text{Fe}(\text{OH})_3$ [mmol/l]	-0,51	-0,32
$\text{O}_2$ [mmol/l]	2,13	1,39
$\text{CO}_2$ [mmol/l]	6,24	5,61

Tabelle 2: Durch inverse Modellierung berechnete Phasenumsätze vom Regenwasser oder Wasser des Christsieper Erbstollens zum Wasser des Franziska Erbstollens (positive Werte bedeuten eine Lösung, negative Werte eine Ausfällung; Die Ergebnisse sind aufgrund der großen Unsicherheit in der inversen Modellierung nur als Abschätzung zu verstehen)

	Gemessen	Modelliert	Gemessen	Modelliert
	Franziska Erbstollen	Franziska Erbstollen	Schlebuscher Erbstollen	Schlebuscher Erbstollen
pH	6,7	6,3	6,5	6,6
El. Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1432	1067	603	541
$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	87,2	94,9	47,5	50
$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)	34,0	69,3	23,7	28,6
$\text{Na}^+$ (mg/l)	175,0	35,8	32,2	18,3
$\text{Fe}_{\text{ges.}}$ (mg/l)	3,3	7,8	0,1	0,6
$\text{Cl}^-$ (mg/l)	56	55,5	28,6	28,4
$\text{CO}_{2\text{ges.}}$ (mg/l)	434,7	444,4	192,7	190,0
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	278	265	88,1	94,3
$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	549	322	221,5	179
Calcit (mmol/l)		0,52		0,031
Dolomit (mmol/l)		2,85		1,18
Pyrit (mmol/l)		1,4		0,48
Halit (mmol/l)		1,5		0,77
$\text{Fe}(\text{OH})_3$ (mmol/l)		-1,23		-0,47
$\text{O}_2$ (mmol/l)		5,1		1,8
$\text{CO}_2$ (mmol/l)		2,6		1,1

Tabelle 3: Durch Vorwärtsmodellierung berechnete Wasserqualität und Phasenumsätze ausgehend von Regenwasser zum Wasser des Franziska oder Schlebuscher Erbstollens (positive Werte bedeuten eine Lösung, negative Werte eine Ausfällung)

neutralisiert. Die Auflösung von Halit dient der Erhöhung der Natrium- und Chloridkonzentrationen in den Erbstollenwässern. Die Ergebnisse der inversen Modellierung können jedoch aufgrund der zugelassenen Unsicherheiten nur als Näherungslösung betrachtet werden.

Neben dieser inversen Modellierung wurde zusätzlich eine Vorwärtsmodellierung mit dem Programm PHREEQC realisiert. Dabei wurden die Phasen Sauerstoff(g), Kohlendioxid(g), Calcit(s), Dolomit(s), Pyrit(s), Halit(s) und  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (s) genutzt, die schon bei der inversen Modellierung relevant waren. Weitere Reaktionen scheinen jedoch notwendig, um die Wasserchemie der Erbstollenwässer noch genauer nachzubilden.

Bei den modellierten Werten der Wasseranalysen wurde eine passable Anpassung zu den Messwerten erzielt (Tabelle 3). Größere Abweichungen werden vor allem bei der Natriumkonzentration beobachtet. Bei einer gleichzeitig guten Anpassung der Chloridkonzentrationen weist dies auf eine weitere Natriumquelle als die der Lösung von NaCl (Halit), wie z. B. die Lösung eines Natriumfeldspates, hin. Dies ist insbesondere beim Wasser des Franziska Erbstollens sichtbar. Wedewardt [4] gibt in einer Sandsteinprobe einen Natriumgehalt von 1,1 Gew. % und in einer Sandschieferprobe von 0,7 Gew. % an, was auf die Anwesenheit von natriumhaltigen Silikaten in den Gesteinen des Oberkarbons hinweist. Da in den Erbstollenwässern jedoch keine Messung der Silizium- und Aluminiumkonzentrationen erfolgte, wurde Feldspate in den Modellierungen nicht berücksichtigt, um nicht weitere Unsicherheiten einzubauen. Größere Abweichungen zwischen den gemessenen und den modellierten Daten werden noch beim Hydrogenkarbonat beobachtet, die vor allem durch unterschiedliche pH-Werte und Gesamtkohlendioxidkonzentrationen verursacht werden (Tabelle 3). Deshalb kann auch hier nur von einer Näherungslö-

sung gesprochen werden. Bei der Modellierung beider Erbstollenwässer wurde eine Lösung von Karbonatmineralen (Calcit und Dolomit) berechnet, die auch in den Nebengesteinen als Mineralinhalt beschrieben werden [25]. Durch Sauerstoffzugabe und Reaktion wurden eine Auflösung von Pyrit und eine nachfolgende Ausfällung von Eisen(III)-Hydroxid in beiden Wässern modelliert. Übereinstimmend wurde ein Kohlendioxideintrag in beiden Wässern berechnet. Eine mögliche Erklärung könnte ein Kohlendioxideintrag aus dem Eintrag und der Oxidation von Methan ( $\text{CH}_4$ ) darstellen. Dabei bildet sich Kohlendioxid in seinen verschiedenen Spezies. Bei der inversen Modellierung und der Vorwärtsmodellierung wurde eine Lösung von Karbonatmineralen in beiden Fällen berechnet. Dies scheint die Calcium (Magnesium) und Kohlendioxidkonzentrationen der Erbstollenwässer stark zu prägen. Wedewardt [4] gibt in einer Sandsteinprobe einen Calciumgehalt von 0,1 Gew. % bzw. einen Magnesiumgehalt von 0,4 Gew. % und in einer Sandschieferprobe einen Calciumgehalt von 0,2 Gew. % bei einem Magnesiumanteil von 1,0 Gew. an, was auf die Anwesenheit von Calcit und Dolomit in den Gesteinen des Oberkarbons hinweisen kann. Bei allen Modellierungen (Tabellen 2 und 3) wurde eine Oxidation von Pyrit durch einen Sauerstoffeintrag berechnet, was zur beobachteten Erhöhung der Sulfatkonzentrationen und zum Eintrag von Eisen(II) führt. Das bei der Pyritoxidation freigesetzte Eisen wird überwiegend durch die Fällung von Eisen(III)-Hydroxid nach Oxidation dem Wasser entzogen (siehe Abbildung 2). Dies erklärt die beobachteten Tropfsteine aus Eisenoxid im Schlebuscher Erbstollen [2] und die sichtbare Eisenfällung an den Stollenmundlöchern. Niedrige Konzentrationen des freigesetzten Eisens verbleiben in den Erbstollenwässern in Lösung (Tabelle 1). Dies können bis zu ca. 5 mg/l sein.

## Literatur

- [1] Koetter, G.: *Von Flözen, Stollen und Schächten im Muttental*, Klartextverlag, 64 S., 2007.
- [2] Mügge, V., Wrede, V., Drozdowski, G.: *Von Korallenriffen, Schachtelhalmen und dem Alten Mann*, Klartextverlag, 160 S., 2005.
- [3] Heitfeld, M., Rosner, P.: *Auswirkungen eines Grundwasseranstiegs im Ruhrgebiet – bisherige Erfahrungen und Strategien*. In: Deutsches Bergbau-Museum Bochum (Hrsg.): *Nachbergbauzeit in NRW*, 2011, 2013, 2015, Band 217, S. 145-157, 2016.
- [4] Wedewardt, M.: *Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier*. DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 39, 172 S., 1995.
- [5] Internetquelle: [www.ruhrkohlenrevier.de](http://www.ruhrkohlenrevier.de) (27.03.2017)
- [6] Krome, A.-K.: *Wasserchemie von Erbstollen in der näheren Umgebung von Bochum*. Unveröffentlichte BSc.-Arbeit, Ruhr-Universität Bochum, 143 S. Bochum, 2010.
- [7] DIN 38409-7: *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Teil 7: Bestimmung der Säure- und Basekapazitäten (H 7)*, 2005.
- [8] DIN 38404-10: *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe C) – Teil 10: Berechnung der Calcitsättigung eines Wassers (C 10)*, 2012..
- [9] Wisotzky, F.: *Angewandte Grundwasserchemie*, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung. Springer Verlag: 449 S., 2011.
- [10] DIN ISO 14911: *Bestimmung der gelösten Kationen  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , und  $\text{Ba}^{2+}$  mittels Ionenchromatographie*. 1999.
- [11] DIN EN ISO 10304-1: *Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie – Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat*. 2009.
- [12] Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.: *PHREEQC – A computer code for speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport and inverse geochemical calculations*, 2015.
- [13] Wolkersdorfer, C., Bantele, M.: *Die Oberbayerische Pechkohlenmulde – Hydrogeochemische Untersuchungen der Grubenwässer*. Grundwasser, Heft 18-3, 2013, S. 185-196., 2013
- [14] Walther, J.V.: *Essentials of Geochemistry*. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, 704 S., 2005.
- [15] Merkel, B., Planer-Friedrich, B.: *Grundwasserchemie*. Springer Verlag, 219 S., 2002.
- [16] Appelo, C.A.J., Postma, D.: *Geochemistry, groundwater and pollution*, Balkema Publishers, 649 S., 2005.
- [17] Wisotzky, F., Lenk, S.: *Grundwasserchemie und hydrogeochemische Reaktionen in den Braunkohleabraumkippen des Tagebaues Inden*. in: Merkel, B., Schaben, H., Wolkersdorfer, Ch., Hasche-Berger, A. [Hrsg.]: *Behandlungstechnologie für bergbaubeeinflusste Wässer*. Wissenschaftliche Mitteilungen Institut für Geologie Heft 35, 107-116 S., 2007.
- [18] Lenk, S., Wisotzky, F.: *Chemische Beschaffenheit und modellierte Genese von Grundwässern in Braunkohlenabraumkippen des Tagebaues Inden*. Grundwasser, 12, Heft 4, S. 301-313, 2007.
- [19] Lecomte, K.L., Pasquini, A.I., Depetris, P.J.: *Mineral weathering in a semiarid mountain river: Its assessment through PHREEQC inverse modeling*. – Aquatic geochemistry, 11,2, 173-194., 2005.
- [20] Sharif, M.U., Davis, R.K., Steele, K.F., Kim, B., Kresse, T.M., Fazio, J.A.: *Inverse geochemical modeling of groundwater evolution with emphasis on arsenic in the Mississippi River Valley alluvial aquifer, Arkansas (USA)*. J. of Hydrology, 350, 41-55., 2008.
- [21] Wisotzky, F.: *Einsatz hydrogeochemischer Modelle in der Wasseraufbereitung*. – Grundwasser, Heft 17-2012, S. 171-176., 2012.
- [22] Koetter, G.: *Steinkohle unter Witten*. Beiträge zur Geschichte der Stadt Witten, Bd. 6, 147 S., 2009.
- [23] Drozdowski, G. Koetter, G.: *Geologie und Bergbau im südlichen Ruhrgebiet – das Muttental bei Witten*. Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., 90, S. 287-316, 2008.
- [24] Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen: *Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, 4509 Bochum mit Erläuterungen*. 1988
- [25] Bertsch, W.: *Beurteilung der Verwendung von Waschbergen als Dammbaumaterial und zur Sohlenaufhöhung*. Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1990.

## Autor

Prof. Dr. Frank Wisotzky  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl Angewandte Geologie / Hydrogeologie  
Universitätsstraße 150  
44801 Bochum

E-Mail: [frank.wisotzky@rub.de](mailto:frank.wisotzky@rub.de)

