

Die Oberbayerische Pechkohlenmulde – Hydrogeochemische Untersuchungen der Grubenwässer

Christian Wolkersdorfer · Martin Bantele

Eingang des Beitrages: 5.9.2012 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 8.4.2013 / Online veröffentlicht: 9.8.2013
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Zusammenfassung Aus mehreren Dutzend aufgelassener Stollen der Pechkohlenbergwerke in Oberbayern fließt Grubenwasser in die Vorfluter. Bisher wurden die austretenden Grubenwässer weder gereinigt, noch existieren wissenschaftliche Untersuchungen dazu. Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse der Grubenwasseranalysen von 17 Austrittsstellen.

Die elektrische Leitfähigkeit erreicht bis zu 4.900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, und mit einem Durchfluss von 2 m^3/min sowie einer Eisenkonzentration von 13 mg/l ist der Ventilatorstollen an der Leitzach die problematischste Austrittsstelle. Fast alle Wässer sind Calcium-Hydrogencarbonatwässer und einige wenige Calcium-Magnesium-Sulfatwässer. Wie die Modellierung mit PHREEQC zeigt, sind die kontrollierenden Phasen in den weniger mineralisierten Grubenwässern Calcit, Dolomit, Aragonit, Otavit, Rhodochrosit, Magnesit und Baryt. In den höher mineralisierten Grubenwässern kommen noch Anhydrit, Gips und Jarosit als kontrollierende Phasen hinzu.

Ein dauerhafter umweltschädigender Einfluss des austretenden Grubenwassers auf die Vorfluter kann vermutlich ausgeschlossen werden, da die pH-Werte der Grubenwässer im Allgemeinen gut gepuffert zwischen 6,7 und 8,3 liegen und die potenziell toxischen (Halb-)Metalle nicht mobil sind.

In memoriam Heiner Schuster.

Zusätzliche Information The online version of this article (doi:10.1007/s00767-013-0230-8) contains supplementary material, which is available to authorized users.

C. Wolkersdorfer (✉)
International Mine Water Association,
Ginsterweg 4, 90530 Wendelstein, Deutschland
E-Mail: christian@wolkersdorfer.info

M. Bantele
Sonnenstraße 49, 86956 Schongau, Deutschland

The upper Bavarian pitch-coal syncline/Germany—hydrogeochemical mine water studies

Abstract Several dozen abandoned adits of the Upper Bavarian pitch (bituminous)-coal mines are discharging mine water into receiving streams. In the past, these mine waters have neither been treated nor scientifically investigated. This paper describes the results of 17 mine water samples. With an electrical conductivity of 4,900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a flow of 2 m^3/min and an iron concentration of 13 mg/l , the Ventilatorstollen adit at the river Leitzach is the most problematic discharge location. Nearly all waters are Ca-bicarbonate waters and some Ca-Mg-sulfate waters. As has been shown by modeling with PHREEQC, calcite, dolomite, aragonite, otavite, rhodochrosite, magnesite and barite are the controlling phases in the lower mineralized mine waters. In addition, controlling phases in the higher mineralized mine waters are anhydrite, gypsum and jarosite. At the moment, permanent environmental damage can be excluded with high certainty because the mine waters are well buffered at pH-values between 6.7 and 8.3 and the potentially toxic (trace) metals are not mobile.

Keywords Mine water · Pitch-coal · Bavaria · PHREEQC · Hydrogeochemistry

Einführung

Pechkohle ist eine Braunkohle, mit dem Charakter einer Glanzbraun- bis Flammkohle (Ammon 1909, Teichmüller & Teichmüller 1975), die hauptsächlich in Bayern abgebaut wurde. Bislang existiert keine umfassende hydrogeologische oder hydrogeochemische Untersuchung

Tab. 1 Verzeichnis aller aufgesuchten Bergwerksstollen in der Bayerischen Pechkohlenmulde mit Wassertyp und Durchfluss, angeordnet von West nach Ost. Koordinaten in UTM WGS84

Bezeichnung	Lokalität	UTM Rechts	UTM Hoch	Höhe [mNN]	Datum	Wassertyp	Durchfluss [l/min]
PHS	Hohenpeißenberg Hauptstollen	32T 651213	5295340	800	2008-05-08	Ca-Mg-HCO ₃	2,6
MST	Peißenberg Mittelstollen	32T 653410	5295835	720	2008-05-08	Ca-SO ₄ -HCO ₃	104, 9...159,6
PSS	Peißenberg Sulzerstollen	32T 653604	5295947	683	2008-05-08	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	43,6
TST	Peißenberg Tiefstollen	32T 654109	5295787	636	2008-05-08	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃	217,2
MMS	Marienstein Stollen	32T 700328	5291776	828	2008-07-27	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	3,3
MSH	Marienstein Haldenfuß	32T 701080	5292304	802	2008-04-20	Ca-Mg-SO ₄	12,0
BS4	Wasserstollen	32T 714214	5293214	827	2008-04-27	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃	189,6
BSS	Bärenschützstollen	32T 714606	5294109	813	2008-04-20	Ca-HCO ₃	4,8
LQS	Leitzach Querschlag	32T 715760	5295610	678	2008-04-24	Ca-Mg-HCO ₃	7,4
PST	Phillippstollen	32T 715824	5295482	680	2008-04-24	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	5,0
FST	Ventilatorstollen	32T 716386	5295420	685	2008-04-24	Na-Ca-SO ₄ -HCO ₃	2.092,8
EST	Eckersbergerstollen	32T 720408	5298993	656	2008-04-18	Ca-Mg-HCO ₃	1,0
KES	Kemathstollen	32T 720606	5298943	611	2008-04-18	Ca-Mg-HCO ₃	3,1
AR1	Rösche Achthal-Schacht	32T 721206	5297798	556	2008-06-20	Na-Ca-HCO ₃	< 0,1
DS1	Deisenrieder Stollen	32T 722291	5294333	792	2008-05-29	Ca-Mg-HCO ₃	80,2
AHS	Auer Erbstollen	32T 722614	5298509	510	2008-04-18	Ca-Mg-HCO ₃	5,0
AAE	Alter Auer Erbstollen	32T 722690	5298647	510	2008-04-18	Ca-Mg-HCO ₃	10,3

der Grubenwässer aus den Oberbayerischen Pechkohlenvorkommen. Diese Lücke soll hiermit geschlossen werden und damit auch eine Grundlage zur Erfassung von Grundwasserkörpern gemäß Grundwasserrichtlinie leisten (Richtlinie 2006/118/EG). Um die aufgelassenen Stollen oder Schächte aufzufinden, erfolgten historische Recherchen in Bibliotheken und Archiven sowie Befragungen bei bergbauhistorisch interessierten Vereinen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Recherchen und mithilfe von GIS wurden die Pechkohlenvorkommen lokalisiert (Tab. 1). Methodisch wurde weitgehend den von Perry & Evans (1999) und Perry (2001) im Kohlenbecken der nördlichen Zentralappalachen (USA) angewendeten Methoden gefolgt.

Vornehm et al. (2002) und Vornehm (2005) untersuchten Grubenwässer am Silberberg bei Bodenmais. Über einige wenige Details zur Wasserhaltung der Grube Leonie berichtet Gudden (1987) und potentielle Gefahren durch Grubenwasser beschreibt Pfeufer (1996). Einen Bericht über wasserwirtschaftliche Aspekte der Uranbergbaues in Bayern publizierte Schmederer (1995). Im „Flussbericht Bayern“ werden Grubenwässer im Zusammenhang mit dem Planungsraum Naab – Regen erwähnt (Sulfidzuvorkommen Silbermais), demzufolge „die Gehalte die Umweltqualitätsnormen der WRRL [zum Teil überschreiten], sodass der gute chemische Zustand nicht erreicht wird“ (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit 2012).

Geschichte und geologische Verhältnisse

Zwischen 1464 und etwa 1764 gab es im Süden Bayerns zahlreiche Schurfversuche und Abbaubetriebe auf Kohlen (Bayerisches Hauptstaatsarchiv 1464, Flurl 1792, Schafhäutl 1848, Priesner 1982, Hertle 1898). Industrielles Pechkohlenabbau in Untertagebergwerken bestand vom 19. bis ins 20. Jahrhundert (Hertle 1898, Balthasar 1975, Zorn 1981/82) und in Peißenberg erreichte die Ziegelmeierschachthanlage eine Abbautiefe von über 1.245 Metern mit einer Förderleistung von bis zu 3,8 t verwertbarer Kohle pro Mann und Schicht (Biller & Stippel 2006). Wegen der zunehmenden Verwendung von Rohöl und billigerer Importkohle (Balthasar 1975, Jungk 1975, Müller 2001, Fügner 2006) schloss als letztes bayerisches Pechkohlenbergwerk 1971 aus wirtschaftspolitischen Gründen das Kohlenbergwerk Peißenberg seine Pforten (Jungk 1975, Sepp 2012). Insgesamt betrug der industrielle Pechkohlenabbau im Verlauf der letzten Bergbauperiode 100 Millionen Tonnen (Geißler 1975b, Schmid & Weinelt 1978).

Pechkohle ist tertiären Ursprungs und wurde in einem küstennahen lakustrinen Deltamilieu des subalpinen Molassemeeres abgelagert (z. B. Gümbel 1861, Stuchlik 1906, Gillitzer 1914, Hartmann 1938, Lensch 1961, Schwerdt et al. 1996, Lemcke 1988). Zu jener Zeit herrschte ein tropisches Klima mit einer mittleren Jahrestemperatur von 20 °C bei einem Jahresniederschlag von 1.600 bis 1.800 mm (Barthelt 1989, Barthelt-Ludwig 1991). In Küstennähe befanden sich Alluvialfächer mit einem ausgedehnten Flachwasserbereich,

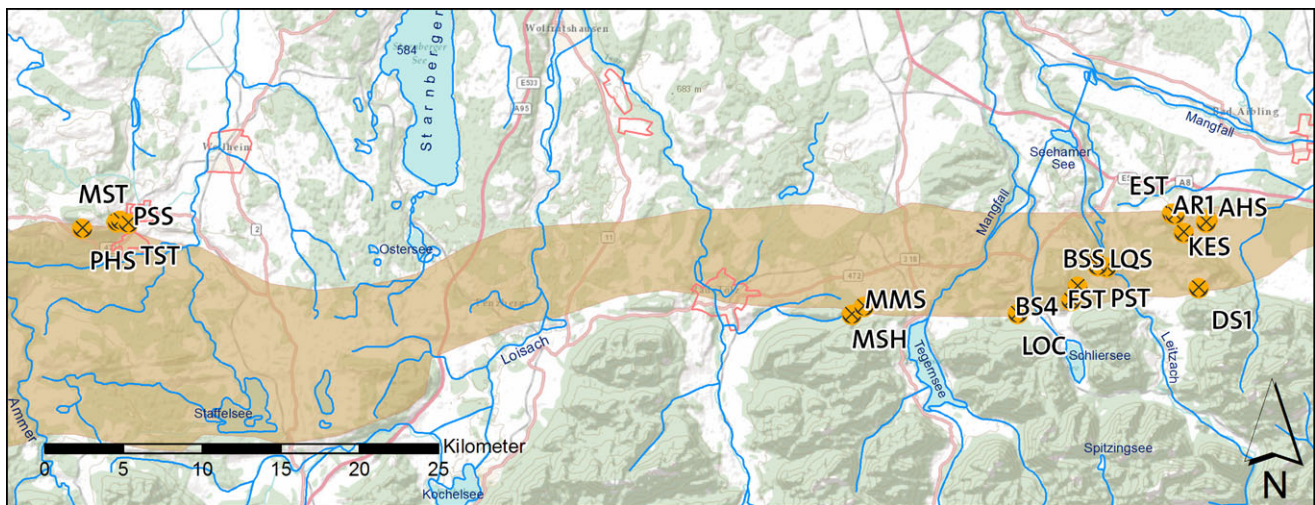


Abb. 1 Südbayerisches Pechkohlenabbaugebiet südlich von München. Probennahmestellen: orange Kreise mit Eisen und Schlegel. Die Hauptmulde, in der die Kohle lagert, ist braun hinterlegt (Basiskarte: ESRI ArcMap 10.4). AHS und AAE liegen zu dicht beieinander um

bei diesem Maßstab als getrennte Punkte zu erscheinen und bei LOC (Loch) trat am Tag der Probenahme kein Wasser aus (daher nicht in Tab. 1 aufgeführt)

der durch Meeresarme, Lagunen und Inseln und Meeresspiegelschwankungen geprägt war. Diese als Molasse bezeichneten Schichten untergliederten Gumbel (1894) und Weithofer (1914) grundlegend in vier konkordant aufeinanderfolgende Schichtgruppen. Altersmäßig umfassen die Pechkohlen davon das Chattium bis Aquitanium (Oberliogozän bis Untermiozän, regionale Stufe Egerium), wobei in Marienstein die ältesten und in Peiting die jüngsten Pechkohlen vorkommen (Geißler 1975b, Schwerdt et al. 1996).

Während der fortschreitenden alpinen Orogenese kam es zur Faltung („Faltenmolasse“, „Subalpine Molasse“ oder „Überschobene Molasse“), die Kohlenflöze wurden tief unter jüngeren Molassesedimenten begraben und deren Inkohlungsgrad erhöhte sich (Teichmüller & Teichmüller 1975, Pinsl 1975). Insgesamt sind so bis zu 31 lokal unterschiedlich benannte Kohlenflöze entstanden, die in hintereinanderliegenden, schuppenförmigen Muldenzügen vorkommen, die allesamt Ost–West gerichtet und etwa 100 km lang und 15 km breit sind. Deren mittlere Flözmächtigkeit betrug 0,5 bis 1 m, erreichte Minimal- und Maximalwerte von 0,1 und 1,5 m (Hertle 1898, Geißler 1975a) und wies eine Dichte von 1,34 bis 1,41 g/cm³ auf (Zincken 1867). Von den sieben tektonischen Mulden standen mehr oder weniger sechs in Abbau, wobei die wirtschaftlich bedeutendsten die Peißenberg-, Penzberg-, Nonnenwald, Hausham- und Miesbachmulde waren (Abb. 1; Schmid & Weinelt 1978).

Genetisch betrachtet wird die Pechkohle heute der Braunkohle zugeordnet (Ammon 1909), wobei es sich um Glanzbraun- bis Flammkohlen handelt (Teichmüller & Teichmüller 1975). Deren Heizwert entspricht dem einer Glanzkohle und beträgt 20 bis 25 MJ/kg. Der Gesamtschwefelgehalt, von dem $\frac{1}{3}$ in Pyrit gebunden ist, liegt zwischen 5

und 7 % (Geißler 1975a) und kann in seltenen Fällen 10 % erreichen (Teichmüller & Teichmüller 1975).

Hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse

Alle Grubenwässer fließen unkontrolliert in Vorfluter der Planungsräume Inn und Isar (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit 2012). Keines der austretenden Grubenwässer wird derzeit gereinigt oder unterliegt einem regelmäßigen Monitoring und in den meisten Fällen ist E.ON Bayern Inhaber der Abbaurechte (Altrechte der bayerischen Oberkohle). Bislang ist das Bergwerkseigentum nicht aufgehoben (pers. Mitt. Peter Freiherr v. Pastor, 2008-07-25) und Entwässerungstollen werden entweder von historischen Bergwerksvereinen genutzt oder liegen auf Privatgrundstücken.

Je nach der mineralogischen Zusammensetzung der Muttergesteine des Rohstoffvorkommens kann Grubenwasser erhebliche Umweltprobleme verursachen (Wolkersdorfer 2008). Saures Grubenwasser entsteht durch Wasser- und Sauerstoffkontakt mit den Di-Sulfiden Pyrit, Markasit oder Pyrrhotin (Singer & Stumm 1970, Stumm & Morgan 1996) und wenn keine ausreichende Menge an puffernden Mineralen zur Verfügung steht. Basisches oder zirkumneutrales Grubenwasser hingegen tritt dort auf, wo säurebildende Minerale gegenüber den puffernden Mineralen zurücktreten (Capo et al. 2001, Younger et al. 2002, Wolkersdorfer 2008).

Hydrogeochemische Untersuchungen der tertiären Kluftgrundwasserleiter in der hydrogeologischen Einheit Faltenmolasse mit geringer bis sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit sowie einer silikatisch-karbonatisch und organischen

Tab. 2 Publierte Analysenergebnisse von Wässern aus der Faltenmolasse. Parameter wie in Tabelle 3 (Wagner et al. 2003). n.b.: nicht bestimmt; –: unterhalb der Nachweis- oder Bestimmungsgrenze; EL:

Bezeichnung	<i>T</i> [°C]	pH [–]	EL [μS/cm]	pE	Fe [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Sr [mg/l]	Ba [mg/l]	HCO ₃ [mg/l]	Cl [mg/l]
<i>Mittelwert</i>	8,1	7,41	494	n.b.	–	44,6	0,8	74	18,3	0,3	0,06	333	54,1
<i>Minimum</i>	6,2	7,00	188	n.b.	–	0,1	–	6	1,0	0,1	0,01	161	–
<i>Median</i>	8,4	7,45	514	n.b.	0,00	1,0	0,5	72	18,8	0,2	0,03	326	1,9
<i>Maximum</i>	13,3	8,56	2.072	n.b.	0,03	2.238,0	10,4	126	33,0	3,8	0,54	1.127	2.848,5
<i>n</i>	66	65	67	0	64	68	68	68	68	37	26	68	68

Bezeichnung	SO ₄ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]	F [mg/l]	Al [μg/l]	As [μg/l]	Cd [μg/l]	Co [μg/l]	Cr [μg/l]	Cu [μg/l]	Ni [μg/l]	Zn [μg/l]	<i>k</i> _{B8,2} [mmol/l]	<i>k</i> _{S4,3} [mmol/l]
<i>Mittelwert</i>	6	5,4	–	3,91	1,95	0,01	0,07	0,70	1,93	0,70	12,31	0,61	5,45
<i>Minimum</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	0,20	–	1,12	–	2,64
<i>Median</i>	5	5,3	–	–	0,12	–	0,07	0,32	0,62	–	2,62	0,50	5,35
<i>Maximum</i>	15	11,4	3,1	75,50	56,52	0,46	0,12	10,23	37,38	20,12	277,40	1,64	18,47
<i>n</i>	68	67	37	37	36	36	36	36	36	36	36	57	60

Gesteinszusammensetzung publizierten Wagner et al. (2003, Zusammenfassung in Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007, 2012). Aus 60 Probennahmestellen wurden Wasserproben entnommen und 36 davon als Vollanalysen analysiert (Tab. 2). Zusammengefasst lassen sich die Wässer als normale erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer bezeichnen, wobei die Konzentrationsabfolge bei den Kationen $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ und bei den Anionen $\text{HCO}_3^- \gg \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ist. Die Medianwerte der elektrischen Leitfähigkeiten in der Faltenmolasse bewegen sich um 490 μS/cm (Wagner et al. 2003).

Methoden

Basierend auf einer Literaturrecherche (z. B. Schmitz 1840, Gümbel 1861, Hertle 1898, Korschelt 1890, Aufzeichnungen des Bayerischen Hauptstaatsarchives und des Bergamts Südbayern) und Geländebegehungen ließen sich 44 aufgelassene Bergwerke lokalisieren. Diese wurden 2008 begangen, und an 17 der Standorte trat Grubenwasser zutage. Mit einem MYRON L Ultrameter 6P sowie WTW-Elektroden (CelloX 325, SenTix 91T, TetraCon 325), angeschlossen an ein WTW-Multiline P4, wurden an sämtlichen Probennahmestellen direkt an der Austrittsstelle des Grubenwassers die Vor-Ort-Parameter (pH-Wert, Redox-Potenzial, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Durchfluss) gemessen, bis der jeweilige Messwert keine relevanten Änderungen mehr zeigte. Außerdem wurden jeweils eine ungefilterte 500 ml Wasserprobe zur Ermittlung der Haptionen sowie eine 0,45 μm gefilterte 50 ml, mit Salpetersäure angesäuerte Wasserprobe für die

elektrische Leitfähigkeit. Bei Al lagen nur 4 Werte oberhalb der Nachweisgrenze

Bestimmung der Spurenelemente entnommen. Mit einem WTW-pH-Messgerät und dem HACH-Digital-Titrator wurden vor Ort Basen- und Säurekapazität ermittelt. Durchflussmessungen erfolgten mit der Eimer-und-Stoppuhr-Methode oder mittels der Salzverdünnungsmethode (Sommer Tracersystem MST-2; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2002, Wolkersdorfer 2008).

Haptionen und Spurenelemente wurden mit einem Perkin Elmer AAS 3300 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{ges} , Mn, Zn, Al, Na, Sr), einem DIONEX-IC-DX-100 (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) und einem Perkin Elmer SIMAA 6000 (As, Cd, Cu, Ni, Pb, Cr, Co) bestimmt. Die nach Rossum (1975) errechneten elektrischen Leitfähigkeiten wurden mit den gemessenen verglichen.

Alle Grubenwasseranalysen wurden mittels PHREEQC (Version 2.18.0, Parkhurst & Appelo 1999) und dem WATEQ4F-Datensatz chemisch-thermodynamisch modelliert, um die Speziation der Wasserinhaltsstoffe und die Sättigungskoeffizienten (SI) zu ermitteln. Darüber hinaus wurden alle Analysenergebnisse statistisch untersucht.

Beschreibung der Lokalitäten

Nur bei wenigen der besuchten ehemaligen Pechkohlenvorkommen war die Lage der Erbstollen bekannt. Diese werden entweder von historischen Bergwerksvereinen als Besucherstollen genutzt (z. B. Tiefstollen Peißenberg) oder Bergbauinteressierte kennen die exakte Lokalität (z. B. Deisenrieder Stollen). Sie werden derzeit instand gehalten und sind folglich leicht zugänglich. Ein Gesamtverzeichnis der etwa 100

bis 200 Tagelöcher aus ca. fünf Jahrhunderten Pechkohlenabbau fehlt bislang. Balthasar (1975) erwähnt 109 Tagesöffnungen in Penzberg, darunter ein Stollen sowie für Hausham 112 Tagesöffnungen inklusive 37 Stollen.

In etlichen Fällen war es trotz mehrmaliger Begehung unmöglich, die Lage von Stollen oder Grubenwasseraustritten zu identifizieren. In Großweil, wo es einen Braunkohlenabbau gab (Resch 1924, Schmid & Weinelt 1978), könnte möglicherweise das Freibad zum Teil von Grubenwasser gespeist werden und in Penzberg befindet sich heute eine große Pharmafirma weitgehend im Bereich der ehemaligen Stollen. Im Birkengraben bei Miesbach sowie in Miesbach selbst gibt es keine Hinweise mehr auf die Lage der ehemals so bedeutenden Stollen auf Pechkohlen.

Eine detaillierte Beschreibung aller aufgesuchten Stollen würde den Rahmen des Artikels sprengen; daher soll lediglich eine tabellarische Zusammenfassung der Stellen gegeben werden, an denen Wasserprobennahmen stattfanden (Tab. 1).

Gesteine und Spurenelemente in den Kohlenvorkommen

Alle Pechkohlenvorkommen kommen in den überwiegend klastischen Gesteinseinheiten der Unteren und Oberen Brackwassermolasse vor, die altersmäßig im Chattium und Aquitanium angesiedelt ist (Schwerd et al. 1996). Die Gesamtmächtigkeit der flözführenden Horizonte beträgt 1.000 bis 2.000 m. Demgegenüber ist die Mächtigkeit der Flöze mit zusammen 10 bis 20 m vernachlässigbar gering. Zwar war die überwiegende Streckenlänge der Auffahrungen innerhalb der Flöze, doch diese sind weitgehend abgebaut, sodass die Kohle für den Grubenwasserchemismus von untergeordneter Bedeutung ist. Andererseits ist bekannt, dass bereits geringe Mengen an Di-Sulfiden saures Grubenwasser hervorrufen können. Es ist ebenfalls bekannt, dass die Neutralisationskapazität eines Kohlenvorkommens umso kleiner ist, je höher der prozentuale Anteil von Sandstein innerhalb der Muttergesteine ist (Prediction Workgroup of the Acid Drainage Technology Initiative 2000). Untersuchungen zum Versauerungspotenzial oder zur Neutralisationskapazität („Acid-Base-Accounting“, Skousen et al. 2002) der Gesteine in der Faltenmolasse sind unbekannt.

Geißler (1975b) bestimmte in den Kohlen einen Gesamtschwefelgehalt von 5 bis 7 %, wovon $\frac{1}{3}$ Pyrit ist. Daraus errechnet sich ein Pyritgehalt von 3 bis 4 %, was die Ergebnisse von Ligouis et al. (1998) an einem ausgewählten Flöz bestätigen (0,7 bis 5,8 %). Während der aktiven Abbauphase wurde beobachtet, dass sich der Pyrit in den Klüften der Pechkohle in framboidaler Form angereichert hatte (Zinken 1867, Hartmann 1938), und in Penzberg befürchtete man aufgrund des hohen Pyritgehalts sogar eine Selbstentzündung der Pechkohle (Schmitz 1840).

An Spurenelementen in den Kohlen ermittelte Pinsl (1975) Molybdän, Blei, Kupfer, Titan, Vanadium, Zink, Nickel, Chrom, Mangan, Strontium, Barium und Bor, ohne jedoch Konzentrationsbereiche anzugeben. Außerdem ermittelte sie den Urangehalt an Aschen. Hertle (1898) erwähnt außerdem, dass zum damaligen Zeitpunkt alle Grubenhölzer mit dem gut löslichen Zinkchlorid imprägniert waren.

Ergebnisse und Diskussion

Die elektrische Leitfähigkeit der Grubenwässer liegt zwischen 407 und 4.884 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und hat einen Mittelwert von 1.458 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 3). Das liegt deutlich über dem für diese hydrogeologische Untereinheit (Faltenmolasse) bekannten Mittelwert von 494 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Wagner et al. 2003). Auch die mittlere Temperatur der Grubenwässer ist höher als die der Grundwässer in der Faltenmolasse (im Mittel 9,9 °C statt 8,4 °C) während der pH-Wert den üblichen Werten entspricht (7,50 im Vergleich zu 7,45). Diese Werte belegen, dass die physiko-chemischen Parameter der Grubenwässer zum Teil deutlich von denen der hydrogeologischen Untereinheit abweichen. In der Regel liegt die Ionenbilanz zwischen +7 und –9 % mit einem Mittelwert von –2 %. Für die Fehler in der Ionenbilanz könnten die fehlenden Analysen von Lithium (Wagner et al. 2003 zeigen Lithium-Werte von 0,8 bis 6 $\mu\text{g}/\text{l}$; 10 und 90 %-Quartil) oder eine Fehlbestimmung von Hydrogencarbonat verantwortlich sein.

Zehn der Wässer (Abb. 2) sind normal erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatisch, fünf sind erdalkalische Wässer mit höherem Alkaliegehalt, überwiegend sulfatisch (MST, MSH, BS4, TST, FST), eines ist normal erdalkalisch, überwiegend sulfatisch (PSS) und ein letztes ist erdalkalisch mit höherem Alkaliegehalt, überwiegend hydrogenkarbonatisch (AR1; Klassifikation nach Furtak & Langguth 1967). Sämtliche sulfatisch geprägten Grubenwässer weisen elektrische Leitfähigkeiten über 2 mS/cm sowie einen erhöhten Gehalt an Spurenelementen auf. Somit können die Grubenwässer der Marienstein Halde (MSH), Peißenberg Mittelstollen (MST), Peißenberg Tiefstollen (TST), Wasserstollen (BS4) und Ventilatorstollen (FST) als klassische Grubenwässer eingestuft werden. Ihre Massenkonzentrationen an Spurenelementen erreichen bis zu 23 $\mu\text{g}/\text{l}$ Arsen, 6 $\mu\text{g}/\text{l}$ Chrom, 23 $\mu\text{g}/\text{l}$ Nickel, 5 $\mu\text{g}/\text{l}$ Kupfer und 8 $\mu\text{g}/\text{l}$ Kobalt (Tab. 3) und liegen folglich im Einzelfall über den Schwellenwerten der Grundwasserverordnung (GrwV vom 2010-11-09).

Die pH-Werte der Grubenwässer liegen zwischen 6,7 (Ventilatorstollen: FST) und 8,3 (Marienstein: MST). Während der pH-Wert im Ventilatorstollen auf Pyritoxidation hinweist, scheint der Wert der Mariensteinhalde von basischen Aufbereitungskemikalien oder von Rückständen der

Tab. 3 Ergebnisse der Haupt- und Spurenelementanalyse der untersuchten südbayerischen Grubenwässer, nach elektrischer Leitfähigkeit geordnet. EL: elektrische Leitfähigkeit; Fe: Eisen, gefiltert; n.b.: nicht

bestimmt. Fehlende Werte oder solche, die unter der Nachweisgrenze liegen, sind nicht in die statistische Berechnung eingegangen. *Vor-Ort-Parameter Achthalschacht vom Juli 2009

Bezeichnung	T [°C]	pH [–]	EL [µS/cm]	pE	Fe [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Sr [mg/l]	Ba [mg/l]	HCO ₃ [mg/l]	Cl [mg/l]
Ventilatorstollen	14,5	6,68	4.884	n.b.	12,61	620,0	30,7	397	117,4	8,3	0,22	850	13,8
Wasserstollen	11,5	7,24	3.474	n.b.	0,93	304,5	60,9	404	113,3	8,0	0,22	632	97,8
Peißenberg Tiefstollen	16,8	7,13	3.200	2,81	0,11	351,8	16,7	342	92,8	8,5	< 0,6	837	22,3
Peißenberg Mittelstollen	12,0	7,10	2.480	3,06	5,13	165,8	10,8	406	91,2	8,6	< 0,6	577	12,6
Marienstein Halde	10,2	8,34	2.409	7,10	0,06	83,5	195,0	217	101,9	2,8	0,22	155	2,5
Peißenberg Sulzer Stollen	8,5	7,60	1.007	4,56	0,05	15,6	2,3	147	41,5	1,4	< 0,6	350	7,2
Achthalschacht*	9,4	7,46	909	4,30	< 0,05	113,1	4,2	65	21,9	1,0	< 0,1	n.b.	6,4
Alter Auer Erbstollen	n.b.	7,47	849	2,75	< 0,05	24,6	2,8	119	30,1	1,1	0,64	495	23,3
Phillippstollen	9,4	7,12	773	n.b.	0,33	28,0	3,9	111	21,8	1,0	< 0,2	333	8,8
Auer Hauptstollen	9,9	7,10	748	1,86	0,25	22,7	2,5	106	23,7	1,0	< 0,2	461	5,3
Kemathstollen	9,6	7,75	675	5,21	0,06	7,9	2,6	106	24,6	0,9	0,38	431	10,8
Marienstein Marienstollen	7,2	7,72	634	4,01	< 0,05	23,6	2,0	81	21,0	0,6	< 0,1	326	6,7
Deisenrieder Stollen	8,4	7,74	612	10,33	0,04	4,9	1,0	92	21,5	0,4	< 0,6	398	3,8
Eckersberger Stollen	7,4	7,71	603	5,83	< 0,05	3,2	0,8	97	20,0	0,4	0,45	325	2,3
Peißenberg Hauptstollen	8,0	8,28	568	8,89	< 0,04	9,4	0,9	82	18,3	0,2	< 0,6	389	19,0
Bärenschtützstollen	9,5	7,09	560	3,50	0,82	2,5	1,3	101	14,4	0,7	0,26	359	1,5
Leitsachstollen Querschlag	5,3	8,08	407	n.b.	0,06	1,0	0,7	65	13,9	0,2	0,27	243	1,2
<i>Mittelwert</i>	9,9	7,50	1.458	4,94	1,70	104,8	19,9	173	46,4	2,6	0,33	448	14,4
<i>Standardabweichung</i>	2,8	0,46	1.325	2,52	3,72	170,3	47,7	128	38,8	3,3	0,15	193	22,6
<i>Minimum</i>	5,3	6,68	407	1,86	0,04	1,0	0,7	65	13,9	0,2	0,22	155	1,2
<i>Maximum</i>	24,4	8,34	4.884	10,33	12,61	620,0	195,0	406	117,4	8,6	0,64	850	97,8
Bezeichnung	SO ₄ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]	F [mg/l]	Al [µg/l]	As [µg/l]	Cd [µg/l]	Co [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	k _B [mmol/l]	k _S [mmol/l]
Ventilatorstollen	2.334	n.b.	1,2	< 0,3	23,26	0,58	1,36	0,68	3,89	12,66	34	2,62	13,93
Wasserstollen	1.884	6,8	0,6	< 0,3	13,75	0,40	0,46	0,74	3,85	22,61	34	0,66	10,36
Peißenberg Tiefstollen	1.640	1,5	0,7	< 0,3	6,37	< 0,13	< 0,17	0,27	2,40	4,70	13	1,99	13,72
Peißenberg Mittelstollen	1.543	n.b.	0,5	< 0,3	< 3,8	< 0,13	8,03	0,29	5,20	19,79	30	0,75	9,45
Marienstein Halde	1.261	29,0	0,9	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	6,05	2,62	< 0,2	26	0,02	2,54
Peißenberg Sulzer Stollen	286	1,5	0,2	< 0,3	< 3,8	< 0,13	< 0,17	0,44	0,94	2,06	16	0,12	5,74
Achthalschacht*	49	n.b.	0,7	< 0,107	< 2,13	< 0,025	n.b.	0,19	1,29	0,87	< 9,5	n.b.	n.b.
Alter Auer Erbstollen	12	0,9	0,3	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,34	0,68	< 0,2	27	0,70	8,12
Phillippstollen	94	1,4	0,3	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,27	3,94	3,75	17	0,80	5,46
Auer Hauptstollen	17	0,3	0,3	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,35	0,86	< 0,2	21	0,88	7,56
Kemathstollen	14	0,4	0,2	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,19	0,95	< 0,2	31	0,29	7,07
Marienstein Marienstollen	76	4,4	0,2	< 0,107	< 2,13	< 0,025	n.b.	0,53	1,39	1,68	< 9,5	0,20	5,34
Deisenrieder Stollen	25	6,4	0,2	< 0,3	< 3,8	< 0,13	< 0,17	0,30	1,04	1,24	18	0,28	6,53
Eckersberger Stollen	32	17,3	0,2	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,37	3,42	< 0,2	21	0,30	5,32
Peißenberg Hauptstollen	15	7,8	0,2	< 0,3	< 3,8	< 0,13	< 0,17	0,43	1,56	1,89	27	0,16	6,37
Bärenschtützstollen	42	0,3	0,2	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,32	< 0,7	2,61	18	n.b.	5,88
Leitsachstollen Querschlag	17	7,5	n.b.	< 0,3	< 2,4	< 0,1	< 0,2	0,31	1,63	2,59	21	0,05	3,99
<i>Mittelwert</i>	549	6,1	0,4	–	14,46	0,49	3,28	0,71	2,23	6,37	24	0,65	7,34
<i>Standardabweichung</i>	815	8,1	0,3	–	8,47	0,12	4,14	1,38	1,42	7,62	7	0,74	3,17
<i>Minimum</i>	12	0,3	0,2	–	6,37	0,40	0,46	0,19	0,68	0,87	13	0,02	2,54
<i>Maximum</i>	2.334	29,0	1,2	–	23,26	0,58	8,03	6,05	5,20	22,61	34	2,62	13,93

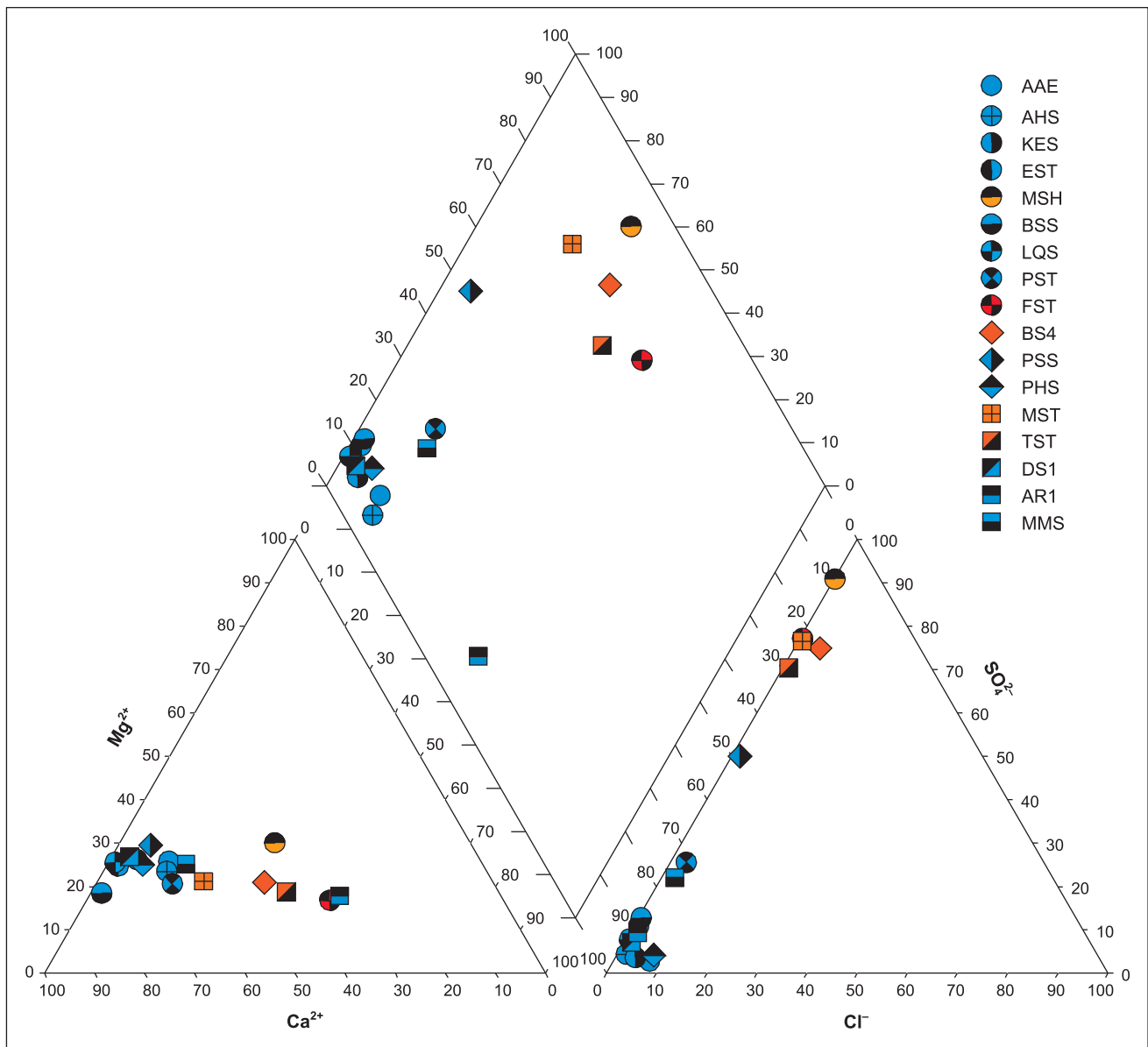


Abb. 2 Piper-Diagramm (Piper 1944, 1953) der 17 Grubenwasseraustritte im Südbayerischen Pechkohlengebiet. Farbabstufung von hellem Cyan zu Rot entsprechend der Gesamtmineralisation der Analyse. Bezeichnungen wie in Tabelle 1

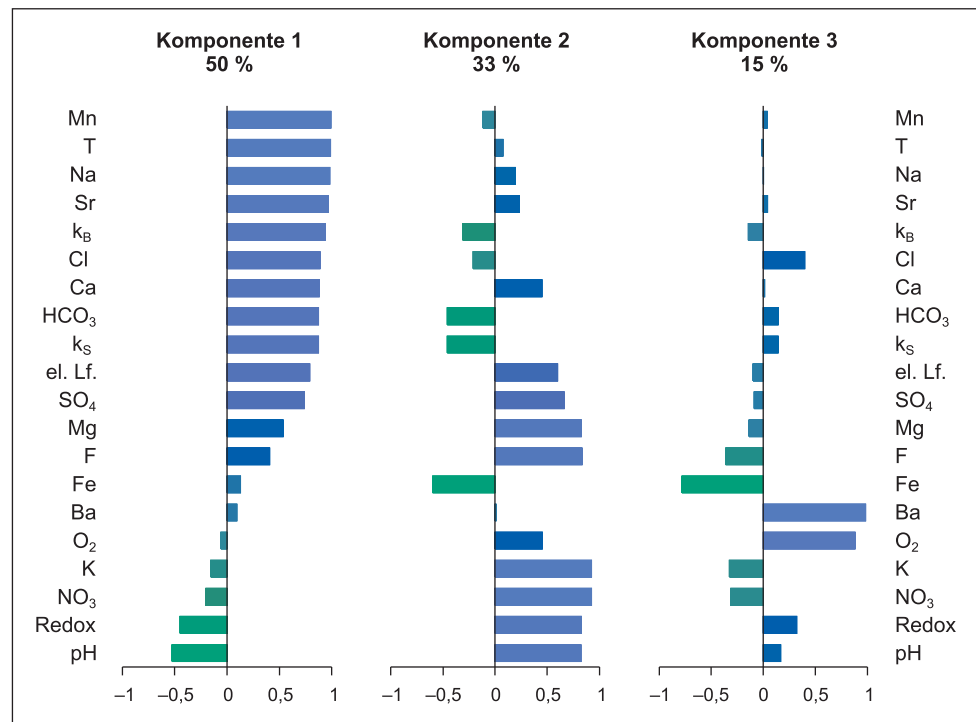
Zementherstellung beeinflusst. Alle anderen pH-Werte bewegen sich zwischen 7,1 und 8,3 und sind somit im hydrogencarbonatischen Pufferbereich angesiedelt, was dem der hydrogeologischen Untereinheit Faltenmolasse entspricht.

Im Frühjahr und Sommer 2008 reichte der Durchfluss der Entwässerungsstollen von 1 bis 2.100 l/min mit einem Durchschnitt von 180 l/min. Der Ventilatorstollen (FST) weist die höchste Abflussmenge auf und ist außerdem der Entwässerungsstollen mit der höchsten elektrischen Leitfähigkeit, Sulfat-, Arsen-, Cadmium- und Eisenkonzentration. Dort liegt die jährliche Fracht bei 14 t Eisen, 26 kg Arsen, 14 kg Nickel, 4 kg Kupfer und ca. 1 kg der in Tabelle 3 ge-

listeten Elemente. Das 1975 errichtete Einlaufbauwerk (Architekt Alfred Ambs; Bayerisches Hauptstaatsarchiv 1971–1979) scheint nur unzulänglich zu funktionieren, denn die Grubenwässer des Ventilatorstollens fließen weitgehend unbehandelt in die Leitzach (Ergänzungsabb. 2 und 3).

Alle Haupt- und Spurenelemente der 17 Analysen wurden mittels bivariater Pearson-Korrelationsanalyse und Hauptkomponentenanalyse statistisch untersucht und anhand der Ergebnisse ein Dendrogramm erstellt (Abb. 3). Deren mittlere bis sehr hohe Korrelationskoeffizienten weisen mit Ausnahme von Chrom auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang hin (Wahrscheinlichkeiten $P = 95\%$). Chrom ist hoch bis sehr hoch mit Kalium und Nitrat korre-

Abb. 3 Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse. Dargestellt sind Balkendiagramme der ersten drei Hauptkomponenten, die zusammen 98 % der Variabilität im Datensatz ausmachen. T: Temperatur; el. Lf: elektrische Leitfähigkeit



liert (Wahrscheinlichkeiten $P = 99 \%$), ohne dass sich dafür eine plausible Kausalität finden ließ.

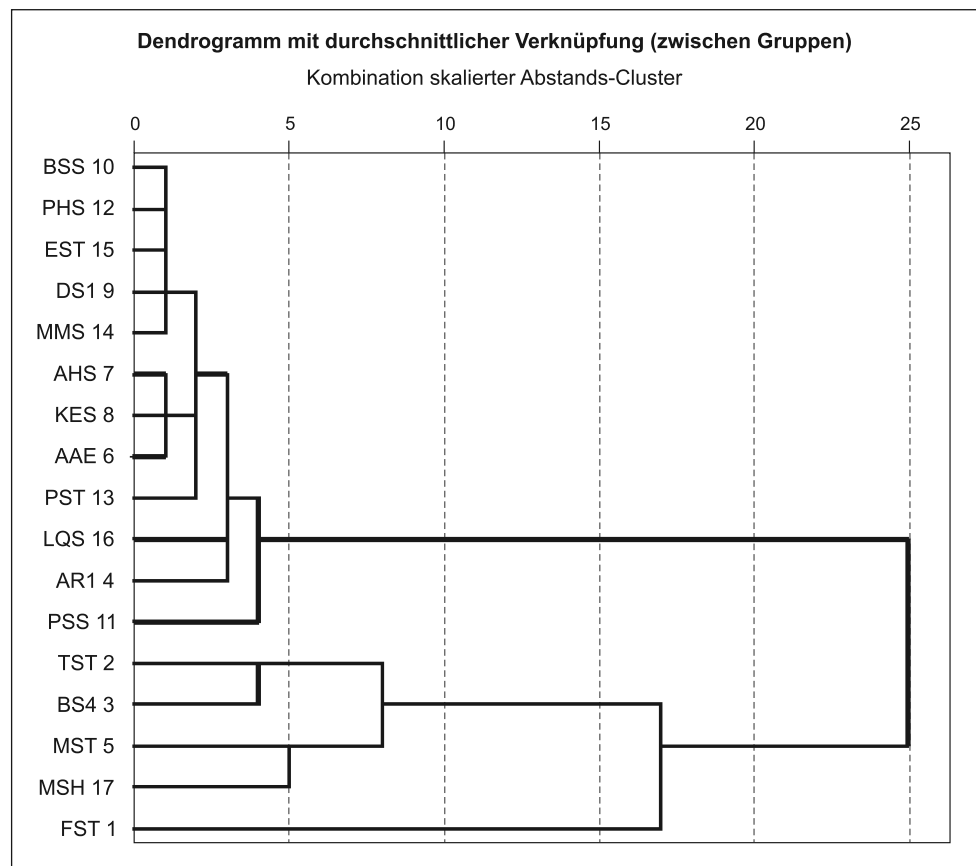
Aus der Hauptkomponentenanalyse ergeben sich 3 Hauptkomponenten, die zusammen 98 % der Varianz erklären. Die erste Hauptkomponente zeigt hohe Ladungen bei den Haptionen, die charakteristisch für karbonatische Gesteine sind (Calcium, Hydrogenkarbonat, Strontium, Mangan) und deckt 50 % der Varianz der Datensätze ab. Die negativen Ladungen von O₂ und NO₃⁻ bei gleichzeitig hohen Ladungen von Mangan und Eisen weisen auf niedrige Redoxpotenziale in diesen Wässern hin. In der zweiten Hauptkomponente, die 33 % der Varianz abdeckt, haben die Haptionen eine hohe Ladung, die auf Gips bzw. Pyritverwitterung hinweisen. Eine hohe Ladung besitzen auch Kalium und Nitrat. Dies kann auf den Einfluss der Düngung oder auf einen Austrag von Kaliumnitrat aus Schwarzpulver hinweisen, das im Pechkohlenbergbau bis Anfang des 20. Jahrhunderts eingesetzt wurde (Weithofer 1920, Mattila et al. 2007 untersuchten den Zusammenhang zwischen modernen Sprengstoffen und Nitrat in Grund- und Grubenwässern). In der dritten Hauptkomponente, die immerhin noch 15 % der Varianz abdeckt, haben Barium und Chlorid relativ hohe Ladungen. Dies deckt sich mit dem Befund von Schmassmann (1990), der mit Zunahme der Chlorid-Konzentrationen auch einen Anstieg der Barium-Konzentrationen nachwies, was auf den Anstieg der Löslichkeit von BaSO₄ bei höheren Chlorid-Konzentrationen zurückzuführen ist (Templeton 1960, Blount 1977).

Aus dem Dendrogramm (Abb. 4) lassen sich zwei Großgruppen und innerhalb der ersten Großgruppe drei weitere

hydrogeochemisch verschiedene Gruppen ableiten. Eine regionale Zuordnung der vier Gruppen ist unmöglich und wegen der teilweise großen durchflossenen Streckenlängen quer durch die verschiedenen Gesteinseinheiten ist auch eine lithologische Zuordnung nur bedingt möglich.

Die Gruppe Ia entspricht weitgehend dem natürlichen Hintergrundwert der Grundwässer in der Faltenmolasse und zeigt kaum für Grubenwasser charakteristische Merkmale. Räumlich lässt sich einzig in der Gruppe Ib mit Auer Hauptstollen, Kemathstollen, Alter Auer Hauptstollen und Philipstollen ein Zusammenhang feststellen. Abgesehen vom Kemathstollen queren die drei anderen Stollen jedoch fast alle das gesamte Miesbacher Grubenfeld, was die austretenden Grubenwässer wenig spezifisch für die eine oder andere lithologische Einheit macht. Interessanterweise liegen sie geochemisch zwischen den wenig mineralisierten Grubenwässern der Gruppe Ia und den stark mineralisierten in der Gruppe II. Ähnliches gilt für die Gruppe Ic, in die Grubenwässer mit relativ langen Stollen fallen. Vermutlich stellen die Gruppen Ib und Ic eine Mischung zwischen der Gruppe Ia und II dar. Bei der Modellierung mit PHREEQC zeigen die Sättigungskoeffizienten kein derart einheitliches Bild, vielmehr scheint die Gruppe I aus zwei Gruppen zu bestehen, bei denen die eine eine geringfügige Übersättigung und die andere eine geringfügige Untersättigung der kontrollierenden Karbonatphasen aufweist. In allen Fällen sind jedoch erwartungsgemäß Calcit, Dolomit, Aragonit, Otavit, Rhodochrosit, Magnesit und Baryt die kontrollierenden Phasen. Bei der Speziesverteilung zeigen die Wässer der Gruppe I keine wesentlichen Unterschiede.

Abb. 4 Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse aus den Parametern Natrium, Strontium, Chlorid, Calcium, Hydrogenkarbonat, k_s , elektrische Leitfähigkeit, Sulfat und Magnesium



Im Dendrogramm fällt die aus fünf Grubenwässern bestehende Gruppe II auf, die sich regional von Peißenberg im Westen bis an den Ventilatorstollen im Osten erstreckt. Sie zeichnet sich durch die erhöhten Konzentrationen an allen Hauptionen, vor allem von Sulfat, aber auch von Spurenelementen aus. Das Grubenwasser der Gruppe II steht mit den pyrithaltigen Pechkohlenflözen in Kontakt, wie die hohen Sulfatkonzentrationen über 1.200 mg/l deutlich belegen. Innerhalb der Gruppe II stellt der Ventilatorstollen einen besonderen Fall dar. Tatsächlich ist dies der Erbstollen mit dem am stärksten mineralisierten Grubenwasser, er weist die größten Durchflussmengen auf und hat folglich von allen untersuchten Stollen die größte Schadstofffracht. Bei der Mariensteinhalde fällt der höhere Gehalt an Kaliumnitrat und Sulfat auf, was auf einen Austrag von Sprengstoffresten einerseits und Gips, der auch auf der Halde zu sehen ist, andererseits zurückzuführen ist. PHREEQC errechnet für die Grubenwässer der Gruppe II, dass wie in Gruppe I die Karbonate Calcit, Dolomit, Aragonit, Otavit, Dolomit, Rhodochrosit und Magnesit kontrollierende Phasen sind. Ein Unterschied zur Gruppe I ist jedoch, dass Baryt in der Gruppe II einen um eine Zehnerpotenz höheren Sättigungskoeffizienten aufweist. Wesentlicher Unterschied ist weiterhin, dass in der Gruppe II auch Gips und Anhydrit sowie verschiede-

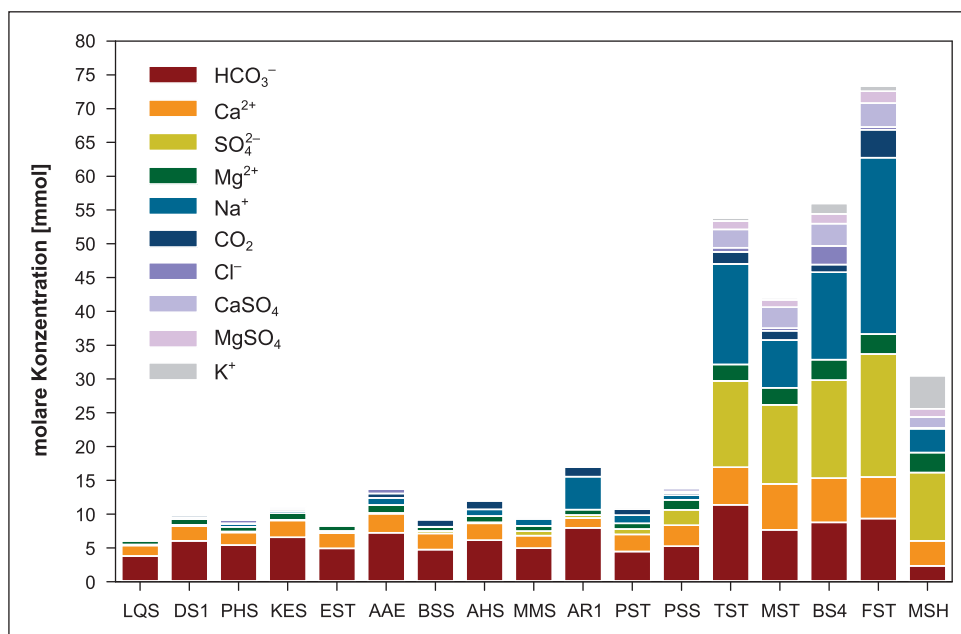
ne Jarosite den Wasserchemismus bestimmen. Dies ist ein Charakteristikum für Grubenwässer.

Wie Abbildung 5 zeigt, weicht die mit PHREEQC errechnete Speziesverteilung in den Grubenwässern der Gruppe II deutlich von der der Gruppe I ab. Neben den höheren Konzentrationen an Sulfat fällt vor allem auf, dass Natrium gegenüber der Gruppe I deutlich höhere Konzentrationen aufweist. Da die Natrium-Konzentrationen und die Chlorid-Konzentrationen nicht stöchiometrisch erhöht sind, ist von Kationenaustausch mit Calcium, Magnesium oder Eisen auszugehen. Während Karbonat in ähnlichen Größenordnungen wie in den Wässern der Gruppe I vorkommt, weisen Calcium, Magnesium, Sulfat und Natrium deutlich höhere Konzentrationen auf. Dies liegt an der Pyritoxidation, die neben Eisen und Sulfat auch Säure produziert und somit eine starke Lösung von Mineralen in den Molassegesteinen bewirkt. Ein charakteristisches Mischwasser zwischen unkontaminiertem Sickerwasser und kontaminiertem Grubenwasser ließ sich chemisch-thermodynamisch nicht identifizieren.

Schlussfolgerungen

In Deutschland und Europa gibt es bislang keine speziellen rechtlichen Bestimmungen für Grubenwasseraustritt-

Abb. 5 Ergebnisse der Modellierung mit PHREEQC. Aufgetragen sind die molaren Konzentrationen der wichtigsten Spezies, die zusammen im Mittel 98 % aller von PHREEQC errechneten Spezies ausmachen



te aufgelassener Bergwerke. Trotzdem sind die Grubenwasseraustritte laut EU-Wasserrahmenrichtlinie (European Commission 2006) Quellen örtlicher Wasserverunreinigung (Ergänzungsabb. 1 und 2) und sollten folglich gereinigt werden. Gemäß Grundwasserverordnung (GrwV vom 2010-11-09) ist es nötig, Wasserqualitäten anhand von Schwellenwerten zu bestimmen (Diskussion dazu z. B. in Keppner 2011). Von den untersuchten Grubenwässern der Pechkohlenmulde werden insgesamt drei der anorganischen Schwellenwerte (in Klammern genannt) in der Anlage 2 der Grundwasserverordnung überschritten: Cadmium (0,5 µg/l: Ventilatorstollen), Arsen (10 µg/l: Wasserstollen) und Sulfat (240 mg/l: in den fünf Grubenwässern und im Sulzerstollen).

Wegen der hohen pH-Werte und Pufferkapazität der Grubenwässer erfolgt eine schnelle Ausfällung der Eisenhydroxide und eine Mitfällung von anderen Metallen und Halbmetallen, sodass es in den meisten Fällen nur zu geringen Kontaminationen kommt. Trotz allem verursachen die Austritte eine visuelle Verschmutzung der Vorfluter (Ergänzungsabb. 2) und in wenigstens einem Fall berichteten Anwohner von einem Wasserausbruch mit „rotem“ Wasser am Ventilatorstollen mit nachfolgendem Fischsterben in der Leitzach (Ergänzungsabb. 3). Möglicherweise handelt es sich dabei um den Grubenwasserausbruch des Jahres 1971 (Schirottke 1971, 1972, Bayerisches Hauptstaatsarchiv 1971–1979), wobei das Fischsterben auch mit der UDN (*Ulcerative Dermal Nekrose*), einer Viruserkrankung, in Zusammenhang gebracht wird (Mann 1972, Bayerisches Hauptstaatsarchiv 1971–1979).

Im Hinblick auf eine gute chemische und ökologische Gewässergüte wäre es wünschenswert wenn die zuständi-

gen Wasserbehörden die Grubenwässer möglichst mit passiven Methoden reinigen würden, da sich diese Anlagen in das Bild der touristischen Region Südbayern einpassen lassen. Ein regelmäßiges Monitoring der fünf problematischen Grubenwasseraustritte ließe erkennen, ob sich die Situation im Einzelfall verschlechtert und ob das Grubenwasser gegebenenfalls zu reinigen ist. Vor allem im Fall des Auer Erbstollens ist eine hydrogeologisch-geotechnische Untersuchung notwendig, um den Hintergrund für den Grubenwasseraustritt am Achthalschacht zu ermitteln, da dieser auf einen potentiellen Verbruch innerhalb des Auer Erbstollens hinweist.

Danksagung Wir danken allen Grundstückseigentümern sowie Peter Freiherrn v. Pastor, M. Kantioler, M. Schmid, B. Siotka, S. Vogl, A. Hensler, Knappenverein Peißenberg, F. Fischer, N.-F. Vogdt, S. Oertel, T. Weinfurter, G. Christner, G. Leander, M. Wandinger, P. Schneider, C. Vornehm, Archiv der Stadt Miesbach, A. Krehbiel und zwei anonymen Gutachtern für ihre Unterstützung und Hilfe.

A. Hanneberg hat durch seine Recherchen im BayHStA den bisher ins Jahr 1594 datierten, ältesten „Steinkohlen“-Bergbau in Bayern um mehr als 130 Jahre auf das Jahr 1464 nach vorne legen können. Dieses Ergebnis ist bislang unpubliziert; daher danken wir ihm besonders dafür, es hier erstmals verwenden zu dürfen. H. Schuster danken wir für die Durchsicht einer früheren Fassung und der Ergänzung im Hinblick auf die Bedeutung von Flurl für den Bayerischen Pechkohlenabbau.

Literatur

- Ammon, L.v.: Die Oberbayerische Pechkohle. Geogn. Jahresh. **22**, 289–302 (1909)
- Balthasar, K.: Geschichte und Bergtechnik der Kohlenbergwerke Penzberg und Hausham. Geol. Bavarica **73**, 7–24 (1975)
- Barthelt, D.: Faziesanalyse und Untersuchungen der Sedimentationsmechanismen in der Unteren Brackwasser-Molasse Oberbayerns. Münch. Geowiss. Abh., A Geol. Paläontol. **17**, 1–118 (1989)

- Barthelt-Ludwig, D.: Rund um die oberbayerische Kohle. Jahresber. Mitt. Freunde Bayer. Staatssmlg. Paläontol. Hist. Geol. **20**, 33–45 (1991)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Hydrogeologische Teilraum I Hydrogeologischer Einheiten – Faltenmolasse. In: http://www.lfu.bayern.de/geologie/hydrogeologie_daten/hydrogeologische_raumgliederung/teilraum/doc/teilraum_faltenmolasse.pdf, http://www.lfu.bayern.de/geologie/hydrogeologie_daten/hydrogeochemische_hintergrundwerte/nach_einheiten/doc/alpen_faltenmolasse.pdf [2013-04-08] (Hrsg.), S. 1–5; 1–3, München (2007, 2008)
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: Intakte Gewässer für Mensch und Natur – Flussbericht Bayern 2012, 493 S. München (2012)
- Billr, M., Stippel, L.: Bergbau und Bergbaumuseum am Hohen Peißenberg – Ein Führer durch die Geschichte des Bergbaus im Bereich des Bayerischen Rigi, 226 S. Peißenberg (2006)
- Blount, C.W.: Barite solubilities and thermodynamic quantities up to 300 °C and 1400 bars. Am. Mineral. **62**, 942–957 (1977)
- Capo, R.C., Winters, W.R., Weaver, T.J., Stafford, S.L., Hedin, R.S., Stewart, B.W.: Hydrogeologic and geochemical evolution of deep mine discharges, Irwin Syncline, Pennsylvania. In: Proceedings of West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, Bd. 22, S. 1–10 (2001)
- European Commission: Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. Off. J. Eur. Communities, L, Legis. **372**, 19–31 (2006)
- Flurl, M.: Beschreibung der Gebirge von Bayern und der Pfalz. Leutner, 642 S. (1792)
- Fügener, K.: Kohlengewinnung in Penzberg – 1796 bis 1966. 42 S. Penzberg (2006)
- Furtak, H., Langguth, H.R.: Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. In: Mem. IAH-Congress, 1965, Bd. 7, S. 86–96 (1967)
- Geißler, P.: Räumliche Veränderung und Zusammensetzung der Flöze in den Kohlenbergwerken Hausham und Penzberg. Geol. Bavarica **73**, 61–106 (1975a)
- Geißler, P.: Zur Geologie im Ostfeld des Kohlenbergwerkes Peißenberg. Geol. Bavarica **73**, 55–57 (1975b)
- Gillitzer, G.: Geologie des Südgebietes des Peissenberger Kohlenreviers im Kgl. bayr. ärar Reservatfeld. Jahresber. k. Geol. R. A. **64**, 149–187 (1914)
- Gudden, H.: Eisenerz. Geol. Bavarica **91**, 25–35 (1987)
- Gümbel, C.W.: Geognostische Beschreibung des bayrischen Alpengebirges und seines Vorlandes, 950 S. Gotha (1861)
- Gümbel, C.W.: Geologische Beschreibung von Bayern: Geologie von Bayern, 1184 S. Kassel (1894)
- Hartmann, E.: Geologie der Peißenberger Pechkohlen-Mulde. Abh. Geol. Landesunters. Bayer. Oberberg A. **30**, 23–46 (1938)
- Hertle, L.: Das oberbayerische Kohlenvorkommen und seine Ausbeute. Glückauf **34**, 853–864 (1898)
- Jungk, G.: Der Kohlenbergbau am Hohenpeißenberg. Geol. Bavarica **73**, 25–35 (1975)
- Keppner, L.: Die neue Grundwasserverordnung. Grundwasser **16**(3), 145–153 (2011)
- Korschelt, F.: Die Haushamer Mulde östlich der Leitzach. Geogn. Jahresh. **3**, 44–64 (1890)
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Durchflussermittlung mit der Salzverdünnungsmethode: Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg, 66 S. Karlsruhe (2002)
- Lemcke, K.: Das Bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit – Erdgeschichte, Bau, Bodenschätze: Geologie von Bayern, 175 S. Stuttgart (1988)
- Lensch, G.: Stratigraphie, Fazies und Kleintektonik der kohleführenden Schichten in der bayerischen Faltenmolasse (Peißenberg, Peiting, Penzberg, Hausham, Marienstein). Geol. Bavarica **46**, 3–52 (1961)
- Ligouis, B., Lu, J., Pils, J.: Coal petrology and rock-eval pyrolysis of a coal seam in the oligocene molasse near Miesbach (Upper Bavaria, Germany): coal depositional environments. Bull. Soc. Géol. France **169**, 381–393 (1998)
- Mann, H.: Die Lachskrankheit (Ulcerative Dermal Nekrose = U D N) in Deutschland. Inf. Fischwirtsch. **19**, 10 (1972)
- Mattila, K., Zaitsev, G., Langwaldt, J.: Biological removal of nutrients from mine waters, 79 S. Rovaniemi (2007)
- Müller, M.: Die „Flözeinhausung“ am Bühlach, eine Erinnerung an den Peitinger Pechkohlenbergbau – Peiting und die Spuren seines Bergbaus. Welf **6**, 195–221 (2001)
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.: User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Res. Invest. Rep. WRI 99-4259, 312 (1999)
- Perry, E.F.: Modelling rock-water interactions in flooded underground coal mines, Northern Appalachian Basin. Geochem.-Explor. Environ. Anal. **1**, 61–70 (2001)
- Perry, E.F., Evans, R.S.: Application of geochemical modeling and hydrologic techniques to interpret sources, mixing and evolution of mine drainage. In: Mining and Reclamation for the Next Millennium, Boulder, S. 444–452 (1999)
- Pfeuffer, J.: Wahrung von Menge und Qualität des Trinkwassers im Nebengestein der Eisenerzlagertätte Leonie in Auerbach (Opf.) während und nach der Abbauphase. Glückauf **132**, 626–635 (1996)
- Pinsl, L.: Chemische Kennzeichen der oberbayerischen Glanzbraunkohle in den Bergwerken Peißenberg und Peiting. Geol. Bavarica **73**, 107–111 (1975)
- Piper, A.M.: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Am. Geophys. Union **25**, 914–923 (1944)
- Piper, A.M.: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. US Geol. Surv. Ground Water Notes – Geochemistry **12**, 1–14 (1953)
- Prediction Workgroup of the Acid Drainage Technology Initiative: In: Kleinmann R.L.P. (Hrsg.) Prediction of water quality at surface coal mines, Morgantown, 241 S. (2000)
- Priesner, C.: Der Bergbau zwischen Mangfall und Leitzach in alter und neuer Zeit. In: Deutsches Museum (Hrsg.): Abh. u. Ber. N.F., 66 S. München (1982)
- Resch, L.: Das Braunkohlenbergwerk Großweil. Bayerland **35**, 388–391 (1924)
- Rossum, J.R.: Checking the accuracy of water analyses through the use of conductivity. J. Am. Water Works Assoc. **67**, 204–205 (1975)
- Schafhäutl, K.E.v.: Über die tertiären Kohlen-Ablagerungen in Bayern. N. Jahresber. Min. Geogn. Geol. Petr. **1848**, 641–657 (1848)
- Schirrotke, W.: Aus der Erde sprudelt braune Gefahr – Fischereiverein befürchte Vergiftung der Leitzach – Vernagelter Rohrstrang. Miesbacher Anz. **77**, 1 (1971)
- Schirrotke, W.: Fischer grollen: Keine Hilfe beim Umweltschutz – Wieder Forellen-Sterben in der Leitzach – Im neuen Jahr alter Ärger mit Grubenwasser. Miesbacher Anz. **78**, 1 (1972)
- Schmassmann, H.: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Technischer Bericht – NAGRA **88-07**, S. 1–244 (1990)
- Schmederer, J.: Wasserwirtschaftliche Aspekte bei der Stilllegung bayerischer Uranbergbauanlagen. In: Proceedings, Uranium-Mining and Hydrogeology, Freiberg, Germany. GeoCongress, Bd. 1, S. 519–524 (1995).
- Schmid, H., Weinelt, W.: Lagerstätten in Bayern. Geol. Bavarica **77**, 160 (1978)

- Schmitz, C.: Beiträge zur Geschichte des Bergbaues auf Braun- und Steinkohlen im Königreich Bayern. Kunst- u. Gewerbebl. **26**, 4–23 (1840). 79–97; 164–176; 236–268
- Schwerd, K., Doppler, G., Unger, H.J.: Gesteinsabfolge des Molassebeckens und der inneralpinen Tertiärbecken. In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000, S. 141–187. Bayerisches Geologisches Landesamt, München (1996)
- Sepp, F.: Bayerische Berg-, Hütten- und Salzwerte AG (BHS): http://www.historisches-lexikon-bayerns.de/artikel/artikel_44417 [2013-04-08], München (2012)
- Singer, P.C., Stumm, W.: Acidic mine drainage—rate-determining step. *Science* **167**, 1121–1123 (1970)
- Skousen, J.G., Simmons, J., McDonald, L.M., Ziemkiewicz, P.: Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines. *J. Environ. Qual.* **31**, 2034–2044 (2002)
- Stuchlik, H.: Die Faziesentwicklung der südbayrischen Oligocänmolasse. *Jahresber. k.-k. Geol. R.-A.* **56**, 277–350 (1906)
- Stumm, W., Morgan, J.J.: *Aquatic chemistry—Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, 1022 S. New York (1996)
- Teichmüller, M., Teichmüller, R.: Inkohlungsuntersuchungen in der Molasse des Alpenvorlandes. *Geol. Bavarica* **73**, 123–142 (1975)
- Templeton, C.C.: Solubility of barium sulfate in sodium chloride solutions from 25 °C to 95 °C. *J. Chem. Eng. Data* **5**, 514–516 (1960)
- Vornehm, C.: Hydro-geochemische Untersuchungen zum System Niederschlag – Boden – Grundwasser im Grundgebirge des Bayerischen Waldes, 185 S. München (2005)
- Vornehm, C., Bender, S., Lehrberger, G.: Impact of ore deposits and anthropogenic activities on local hydrochemistry at “Silberberg”, S. Germany. In: Merkel, B.J., Planer-Friedrich, B., Wolkersdorfer, C. (Hrsg.) *Uranium in the Aquatic Environment*, Heidelberg, S. 1081–1090 (2002)
- Wagner, B., Töpfner, C., Lischeid, G., Scholz, M., Klinger, R., Klaas, P.: Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. *GLA-Fachber.* **21**, 1–250 (2003)
- Weithofer, K.A.: Die Entwicklung der Anschauungen über Stratigraphie u. Tektonik im oberbayr. Molassegebiet. *Geol. Rdsch.* **5**, 65–77 (1914)
- Weithofer, K.A.: Das Pechkohlengebiet des bayerischen Voralpenlandes und die Oberbayerische Aktiengesellschaft für Kohlenbergbau – Denkschrift aus Anlaß des 50jährigen Bestandes dieser Gesellschaft (1870–1920), 344 S. München (1920)
- Woltersdorfer, C.: *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines—Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment*, 466 S. Heidelberg (2008)
- Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, R.S.: *Mine Water—Hydrology, Pollution, Remediation*, 464 S. Dordrecht (2002)
- Zincken, C.F.: *Die Physiographie der Braunkohle: Die Braunkohle und ihre Verwendung*, 818 S. Leipzig (1867)
- Zorn, E.H.: Die Oberbayerische Aktiengesellschaft für Kohlenbergbau – Geschichtlicher Abriss und Bestandsbeschreibung. *Mitt. F. Archivpf. Bayern* **27/28**, 32–51 (1981/82)