

Stillgelegte geflutete Erzbergwerke – schädliche Bodenveränderungen gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz?

Georg Wieber

Kurzfassung: In Deutschland wurden über mehrere Jahrtausende Eisen- und Nichteisen-(NE)-Erze abgebaut. Durch den Abbau wurden umweltrelevante Metalle in den Bergwerken geochemisch mobilisierbar erschlossen und hydraulische Durchlässigkeiten geschaffen, die hohe Abstandsgeschwindigkeiten der Gruben-/Grundwässer mit großen Schadstofffrachten ermöglichen. Gegenüber der ungestörten natürlichen Situation wurden die natürlichen Bodenfunktionen – insbesondere Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium zum Schutz des Grundwassers – beeinträchtigt. Daraus können Gefahren und/oder Schäden für das Grund- und Oberflächengewässer resultieren. Es handelt sich dann um schädliche Bodenveränderungen (SBV) im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Daneben gibt es allerdings auch eine Vielzahl gefluteter Erzbergwerke, die Grundwasser hoher Qualität liefern, welches als Rohwasser zur Trinkwassergewinnung genutzt wird und somit keine SBV darstellen.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Menschen ist stark mit den Möglichkeiten Werkzeuge herzustellen verbunden [1]. So wurden erste Stein-Werkzeuge mit Beginn der Steinzeit hergestellt. Die Jungsteinzeit (Töpfern, Viehzucht) datiert in Deutschland von 6.500 bis 3.800 Jahren vor heute. Es folgten die Bronzezeit ab 3.800 Jahren sowie die Eisenzeit ab 2.700 Jahren vor heute. Die notwendigen Rohstoffe wurden durch Bergbau und Aufbereitung gewonnen.

Bereits in der Steinzeit wurden in Mitteleuropa neben Flint/Feuerstein, Jaspis und Hornstein auch Hämatit zur Farbstoffgewinnung abgebaut [1]. Die ältesten Funde von Kupfergegenständen datieren hier um 3.900 v. Chr. [1].

Intensiver Eisen- und Nichteisen (NE)-Erzbergbau wurde in Deutschland bis in die 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts vor allem in den Mittelgebirgsregionen betrieben. Der Beginn ist bereits aus der Latènezeit (500 bis 600 v. Chr.) nachgewiesen [2]. Beispielsweise sind im Schwarzwald sowie im Siegerland eine große Anzahl keltenzeitlicher Renöfen dokumentiert.

Die Eisen- und Nichteisenerzlagerstätten (NE-Erze) der deutschen Mittelgebirge wurden überwiegend hydrothermal gebildet und stehen/standen in meist steil

einfallenden Gängen an. Der moderne Tiefbau drang in Teufen von über 1.000 m unter Geländeoberfläche vor. Mit dem Bergbau einher ging eine Wasserhaltung, mit der der Grundwasserspiegel bis unter das Abbauniveau abgesenkt wurde. Nach Einstellung der Wasserhaltung erfolgte die Flutung der Gruben und die Grubenwässer wurden gezielt in Vorfluter eingeleitet.

Während heute bei bergrechtlichen Abschlussplänen die Belange der Umwelt in Deutschland umfassend zu berücksichtigen sind, geschah dieses – nach heutigen Gesichtspunkten – beim sogenannten „Altbergbau“ häufig nur unzureichend. Dieser hinterließ vielfach nicht abgedeckte Halden und Industrieruinen. Daneben entwässern die gefluteten Bergwerke (teilweise saure/verunreinigte) Grundwässer in die Vorfluter.

Im Folgenden werden die umweltrechtlichen und naturwissenschaftlichen Randbedingungen des ehemaligen Erzbergbaus in Deutschland ermittelt. Die Bearbeitung beschränkt sich aber nur auf den Wasserpfad. Sonstige Gefahren wie Bergschäden oder Stolleneintrübe werden in diesem Beitrag nicht betrachtet.

2. Rechtliche Grundlagen

Bei der Bewertung der Umweltfolgen des ehemaligen Erzbergbaus sind verschiedene Rechtsbereiche einschlägig. Zu beachten ist das Bundesberggesetz (BBergG) [3] mit seinen Verordnungen und landesrechtlichen Regelungen. Darüber hinaus können sich verschiedene wasserrechtliche Tatbestände ergeben (z.B. Einleitungen von Grubenwässern). Für den vor Inkrafttreten des Bundesberggesetzes bereits endgültig stillgelegten „Altbergbau“ gilt es auch andere Rechtsbereiche wie das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) [4] zu prüfen, da das BBergG [3] diesbezüglich keine abschließenden Regelungen trifft.

2.1 Bergrechtliche Regelungen

Der Staat verleiht das Bergwerkseigentum und überwacht den Bergbau. Dies geschieht durch bergrechtliche Verordnungen und Anordnungen sowie durch Betriebsplanverfahren [3]. Das Bergwerkseigentum gibt das Recht, in dem Felde der Verleihung das in der Verleihungsurkunde genannte Mineral aufzusuchen

und zu gewinnen. Hierzu gehört die Berechtigung alle erforderlichen Anlagen über und unter Tage zu errichten sowie die Roherze aufzubereiten. Das Bergwerkseigentum ist weitgehend dem Grundeigentum gleichgestellt. Der Bergwerkseigentümer hat selbst dann das Recht zum betriebsplangemäßen Abbau, wenn schädliche Auswirkungen auf Oberflächengrundstücke erwartet werden können [5]. Bei Schäden ist er jedoch zur Entschädigung verpflichtet.

Bis zum Inkrafttreten des Bundesberggesetzes (BBergG) galt in weiten Teilen Deutschland das „Allgemeine Berggesetz für die Preußischen Staaten“ (ABG) vom 24.06.1865 [6]. Die Überwachung erfolgte nach dem Inspektionsprinzip. Das Betriebsplanverfahren nach dem ABG stellte eine freiwillige Vereinbarung zwischen Bergbehörden und Bergbautreibenden dar [6]. Es diente vielfach zum Schutz der Bergbautreibenden vor strengen bergrechtlichen Anordnungen. Die Bergbehörde hatte einen relativ großen Ermessensspielraum.

Am 01.01.1982 trat das Bundesberggesetz in Kraft. Mit Einstellung des Bergbaus war es damit Aufgabe der zuständigen Bergbehörde dafür Sorge zu tragen, dass keine weiteren Schäden oder Gefahren auftreten. Dies geschieht durch Abschlussbetriebspläne. Hierbei sind auch umfassend die Umweltbelange zu berücksichtigen. Allerdings enthält es keine Regelungen für den bereits vorher abgeschlossenen Altbergbau.

2.2 Wasserrechtliche Grundlagen

Als Bewirtschaftungsziel legt das Wasserrecht (§ 27 WHG) [7] die Erreichung des guten ökologischen und chemischen Zustandes für Oberflächengewässer fest. Abweichungen von diesen Bewirtschaftungszielen sind in §§ 30 und 31 WHG genannt. Unter anderem sind Ausnahmen möglich, wenn die Gewässer durch menschliche Tätigkeiten so beeinträchtigt oder ihre natürlichen Gegebenheiten so beschaffen sind, dass die Erreichung der Ziele unmöglich ist oder mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden wäre (§ 30 Ziff. 1 WHG). § 47 WHG legt die Bewirtschaftungsziele für Grundwässer fest. § 47 Abs. 1 Ziff. 3 WHG fordert den guten mengenmäßigen und chemischen Zustand zu erhalten oder zu erreichen. Eine Verschlechterung des Zustandes ist zu vermeiden (§ 47 Abs. 1 Ziffer 1). Alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkung menschlicher Tätigkeiten sind umzukehren (§ 47 Abs. 1 Ziff. 2 WHG).

Nach § 8 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [7] bedarf einer Benutzung der Gewässer der behördlichen Erlaubnis oder Bewilligung. Im Rahmen bergrechtlicher Betriebspläne erteilt gemäß § 19 Abs. 2 WHG die zuständige Bergbehörde die wasserrechtliche Erlaubnis. Das Wasserhaushaltsgesetz gibt in § 2 seinen sachlichen Anwendungsbereich an. Ein Bach oder Fluss fällt als oberirdische Gewässer in den sachlichen Geltungsbereich gemäß § 2 Abs. 1 Ziffer 1 WHG. Benutzungen im Sinne des WHG stellen unter anderem das Einbringen

und Einleiten von Stoffen in oberirdische Gewässer (§ 9 Abs. 1 Ziffer 4 WHG) und das Entnehmen, Zutagefordern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser (§ 9 Abs. 1 Ziffer 5 WHG) dar. Der Begriff des Einleitens (§ 9 Abs. 1 Ziffer 4 WHG) umfasst flüssige und gasförmige Stoffe jeder Art, aber auch Wasser und gefördertes Grubenwasser. Erforderlich ist jedoch ein auf das Gewässer gerichtetes Handeln. Das diffuse Zusickern von Wässern zum Beispiel aus Halden in Gewässer erfüllt nicht den Tatbestand einer Gewässerbenutzung [8].

Eine gezielte Ableitung von Grubenwasser über einen Tiefen- oder Erbstollen in einen Vorfluter erfüllt nach Meinung des Bearbeiters die Definition einer Gewässerbenutzung des § 9 Abs. 1 Ziffer 4 WHG [9], da:

- Der Tiefe- oder Erbstollen wurde unter anderem (z. T. auch ausschließlich) zu dem Zweck errichtet, um das Gruben- und Grundwasser abzuleiten.
- In den Vorfluter werden die Grubenwässer gezielt eingeleitet.
- Das Ziel, die Grubenwässer abzuleiten, wird durch den Vorfluter erreicht.

Der Abbau auf den Tiefbausohlen war ohne Wasserhaltung nicht möglich. Ebenso war es der zuständigen Bergbehörde bekannt, dass es bei Einstellung der Wasserhaltung auf den Tiefbausohlen zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels bis zum Tiefen Stollen Niveau kommt und von dort das Grund- bzw. Grubenwasser in den Vorfluter abfließt. Die Regelung des geordneten Wasserabflusses musste daher Bestandteil des Abschlussbetriebsplanes gewesen sein. Es ist also davon auszugehen, dass die wasserrechtliche Genehmigung (Erlaubnis) zur Einleitung der Grubenwässer über den Erbstollen im Rahmen der bergrechtlichen Genehmigung (vermutlich unbefristet) miterteilt wurde, da die Abführung der Grubenwässer wesentlicher Bestandteil des gesamten Grubenbetriebes und der ordnungsgemäßen Stilllegung war. Die ordnungsgemäße Ableitung des Grubenwassers muss auf Dauer sichergestellt sein.

2.3 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)

Der Geltungsbereich des Bundes-Bodenschutzgesetzes [4] ist in § 3 BBodSchG geregelt. Es findet Anwendung auf „schädliche Bodenveränderungen und Altlasten“. Eingeschränkt wird der Geltungsbereich allerdings durch die in § 3 Abs. 1 Nr. 1–11 BBodSchG genannten Vorschriften, neben denen das Bundes-Bodenschutzgesetz nur subsidiär zur Anwendung kommt.

Hinsichtlich des behandelten Sachverhalts der Entstehung belasteter Grubenwässer und gegebenenfalls deren Einleitung in Gewässer ist zu prüfen, ob es sich rechtlich um eine schädliche Bodenveränderung (SBV) gemäß § 2 Abs. 3 BBodSchG handelt. Von einer SBV ist auszugehen, wenn eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen vorliegt, die geeignet ist, Gefahren, erhebliche Nachteile oder Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Durch den ehemaligen untertägigen Altbergbau wurden die



Abbildung 1: Pingen im Rheinischen Schiefergebirge

natürlichen Bodenfunktionen in vielen Fällen beeinträchtigt, da geochemische Freisetzungsprozesse – insbesondere durch Änderung des geochemischen Milieus, Vergrößerung der reaktiven Oberfläche erzhaltiger Gesteine sowie Schaffung hochpermeabler hydraulischer Verbindungen – beschleunigt wurden [6]. Vor allem beeinträchtigt ist die natürliche Funktion als Filter-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers (§ 2 Abs. 2 Ziffer 1c BBodSchG). Bei geogen oder pedogen erhöhten Schadstoffgehalten in Böden besteht eine schädliche Bodenveränderung nur, sofern diese in großem Umfang durch Einwirkungen freigesetzt werden (vgl. § 9 Abs. 2 BBodSchV).

Gewässerkontaminationen können bereits eingetretene Schäden im Sinne des BBodSchG darstellen. Sanierungsverpflichtungen beziehen sich nicht nur auf den Boden oder die Altlast, vielmehr sind davon ausgehende und nicht zu trennende (Gewässer-)Folgeschäden mit einzubeziehen. Gefahren und Störungen des Wohls der Allgemeinheit sollen umfassend erfasst und saniert werden (§ 4 Abs. 3 Satz 1 BBodSchG).

Der Geltungsbereich des § 4 Abs. 3 BBodSchG ist vorrangig gegenüber wasserrechtlichen Anordnungen. Allerdings bestimmen sich die bei der Gewässersanierung zu erfüllenden Anforderungen nach den wasserrechtlichen Vorschriften.

3. Hydrogeologie gefluteter Grubenbaue

Bereits zu römischer Zeit wurden steil einfallende Erzgänge in Deutschland abgebaut. Von den Anfan-

gen des Bergbaus bis spät ins Mittelalter war die Erzgewinnung vielfach ein reines Moltern. Mit vermehrtem Erzbedarf ging der Bergbau zum Tagebau über (Abbildung 1).

Zahlreiche Pingen sind Zeugnisse dieses Entwicklungsstadiums des alten Bergbaus und zeichnen den Verlauf der bereits im Mittelalter bekannten Gänge nach. Der nächste Entwicklungsschritt war das Abteufen kleiner Schächte, die dann mit dem Verlauf des Ganges vertieft wurden. Mit zunehmender Abbautiefe stellten sich jedoch Wasserhaltungsprobleme ein. Es musste daher zum Stollenbau übergegangen werden. Bei den steil einfallenden Gängen der deutschen Mittelgebirge erfolgte meist Versatzbau.

Die hydrothermal gebildeten Erzgänge der Deutschen Mittelgebirge fallen meist steil ein. Dabei lassen die – z. B. im Rheinischen Schiefergebirge – verbreiteten (devonischen) Sedimentgesteine nur eine geringe Grundwasserneubildung zu, aber im Bereich ausbeißender Quarz-/Erzgänge – vor allem nach erfolgtem Abbau – können erhebliche Sickerwassermengen zutreten. In den oberen Teufen (Hochbausohlen) wird das „Tagwasser“ über Röschen abgeführt. Auf Vorfluterniveau wurde bei den bedeutenden Gruben ein Wasserlösungs-, Tiefer- oder Erbstollen angelegt, der die Grubenbaue auf diese Höhenlage entwässerte. Mit dem tieferen Abbau war eine Ableitung des zufließenden Grundwassers in freiem Gefälle nicht mehr möglich. Das Wasser musste nun gefördert werden. Die bedeutenderen Gruben bauten bis in Tiefen von mehreren hundert Metern unter Vorfluterniveau das

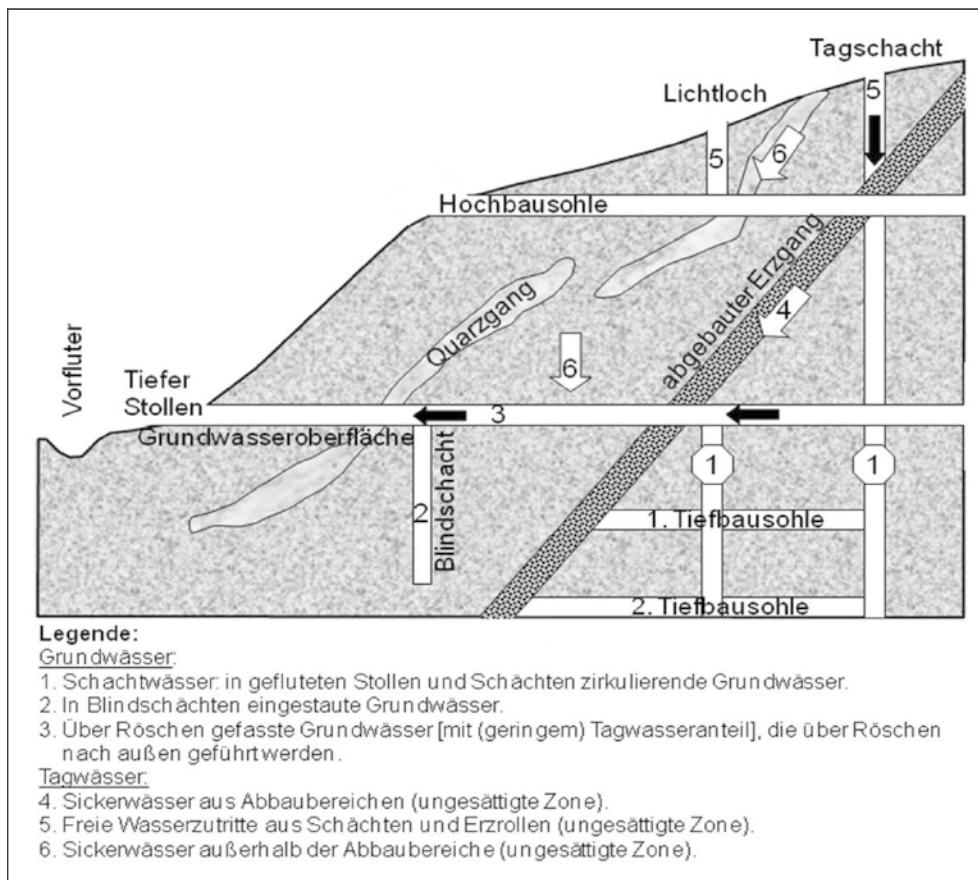


Abbildung 2: Hydrogeologie gefluteter Grubenbaue [9]

Erz ab. Während des Bergbaus musste der Grundwasserspiegel entsprechend abgesenkt werden.

Mit der Aufgabe des Bergbaus wurde auch die Wasserhaltung eingestellt und die Gruben wurden geflutet. Der Grundwasserspiegel stellte sich in der Regel auf Erbstollen-/Tiefe-Stollen- bzw. Vorfluterniveau ein, da die Wasserlösungsstollen weiterhin die Grubenbaue entwässern (Abbildung 2). Gegenüber der ursprünglichen hydrogeologischen Situation vor Beginn der bergbaulichen Tätigkeit ist der Grundwasserspiegel dementsprechend abgesenkt. Die hydrogeologischen Verhältnisse ehemaliger untertägiger Bergwerksanlagen sind in der Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Durch den Bergbau wurden die Grundwasserdyamik und die hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer signifikant verändert. Die Stollen und Schächte sind stark vereinfacht als ein System kommunizierender Röhren mit hohen Fließgeschwindigkeiten anzusehen [9]. Daneben stellen die verfüllten Abbaubereiche anthropogen geschaffene überwiegend gut durchlässige Porengrundwasserleiter innerhalb der meist nur gering permeablen Kluftquarifere dar. Der Erzbergbau wurde überwiegend als Versatzbergbau betrieben, die durch den Abbau entstandenen Hohlräume wurden also überwiegend wieder verfüllt. Dabei stammten beim NE-Alterzbergbau die rückversetzten Gesteine häufig aus dem Abbau selbst, es waren nicht (ausreichend) erzhaltige Ganggesteine, oder es handelte sich um Aufbereitungsrückstände, die über

Erzrollen wieder nach untertage verfüllt wurden (z.B. Eisenerzbergbau im Siegerland). Diese rückverfüllten Berge besitzen zwar gegenüber den anstehenden Erzgängen nur geringere Metallgehalte, dafür sind Permeabilität und Oberfläche signifikant erhöht, sodass geochemische Lösungsvorgänge beschleunigt und bis in größere Tiefen erfolgen können. Hinzu kommen die hohen Fließgeschwindigkeiten und konzentrierten Grubenwasseraustritte mit hohen Schüttungen über die Tiefen Stollen. So werden punktuell hohe Schadstofffrachten in kleine Vorfluter eingeleitet, die zu einer biologischen Verödung der Gewässer führen können.

Die hydrochemischen Beschaffenheiten von Grubenwässern können erhebliche Unterschiede aufweisen. Sie sind beispielhaft von den geologisch-hydrogeologisch-mineralogischen Verhältnissen sowie der Art der Lagerstätte und des Bergbaus abhängig. Auch zeitlich kann es zu deutlichen Veränderungen der hydrochemischen Inhaltsstoffe an. Zunächst können nach der Flutung lösliche Oxidationsminerale mobilisiert werden. Bekannt sind insbesondere saure Grubenwässer mit hohen Metall- und Sulfatgehalten/-frachten. Aber auch die Zutritte Kohlensäure führender (tieferer) Grundwässer, wie sie in weiten Bereichen des Schiefergebirges beobachtet wurden, haben maßgeblichen Einfluss auf die hydrochemische Beschaffenheit der Wässer.

4. Bewertungsgrundlagen

Zunächst gilt es die Frage zu beantworten, ob ein Grundwasserschaden innerhalb des Bergwerks vorliegt. Zur Abgrenzung geringfügig erhöhter Werte von schädlichen Grundwasserkontaminationen wurden von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [10] die sogenannten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) abgeleitet. In der Tabelle 1 sind die für den ehemaligen Erzbergbau relevanten Parameter angegeben. Die Ableitung erfolgte auf Grundlage human- und ökotoxikologischer Daten. Die Geringfügigkeitsschwelle (GFS) definiert die Konzentration eines Stoffes, bei der trotz einer Erhöhung der Gehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden [10]. Als Vergleichswerte zur Hintergrundbelastung in Deutschland sind diesen die flächengewichteten 90-Perzentilwerte von 15 hydrogeologischen Bezugsräumen gegenübergestellt.

Über Tiefe- oder Erbstollen wird das Grundwasser in oberirdische Gewässer/Vorfluter eingeleitet. Das Wasserhaushaltsgesetz [7] (§1 WHG) fordert, „durch nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen“ (Bewirtschaftungspläne für oberirdische Gewässer: §27 WHG).

Gemäß §29 WHG ist ein guter ökologischer und chemischer Zustand der oberirdischen Gewässer – in die die Grubenwässer eingeleitet werden – sowie ein gutes ökologisches Potenzial und ein guter chemischer Zustand der künstlichen und erheblich veränderten Gewässer bis zum 22. Dez. 2015 zu erreichen, wobei bei verschiedenen Randbedingungen Fristverlängerungen möglich sind (§29 Abs. 2 WHG).

Verbindliches Entwicklungsziel für oberirdische Gewässer ist somit grundsätzlich die Erreichung des guten ökologischen und chemischen Zustandes. Die Bewertung des ökologischen Zustandes umfasst biologische Qualitätskomponenten, wobei der Zustand in einer 5-skaliigen Matrix von sehr gut über gut, mäßig,

Tabelle 1: Geringfügigkeitsschwellenwerte für Erzbergbau relevante Parameter [Auszug, 10]

| Parameter | Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$] | 90-Perzentil der hydrogeologischen Bezugsräume [$\mu\text{g/l}$] |
|-----------------|---|--|
| Arsen | 10 | 2,6 |
| Antimon | 5 | 0,4 |
| Barium | 340 | 186 |
| Blei | 7 | 3,9 |
| Cadmium | 0,5 | 0,3 |
| Chrom (Cr-ges.) | 7 | 2,4 |
| Kobalt | 8 | 5,7 |
| Kupfer | 14 | 10,1 |
| Nickel | 14 | 12,6 |
| Quecksilber | 0,2 | 0,15 |
| Selen | 7 | 1,6 |
| Zink | 58 | 49,8 |
| Chlorid | 250 | keine Angabe |
| Sulfat | 240 | keine Angabe |

unbefriedigend bis schlecht eingruppiert wird. Die biologischen Qualitätskomponenten von Gewässern umfassen Fische, Makrozoobenthos, Makrophyten sowie (bei Seen und größeren Fließgewässern) das Phytoplankton [11]. Kleinere Gewässer mit einem Einzugsgebiet <10 km² werden derzeit nicht bewertet.

Der chemische Zustand ist zweiskalig und ist mit „gut“ oder „nicht gut“ zu bewerten. Handlungsbedarf besteht, wenn der ökologische Zustand schlechter als „gut“ oder der chemische Zustand als „nicht gut“ einzustufen ist. Bei der physikalisch-chemischen Überwachung werden mehrere Bereiche unterschieden, die jeweils unterschiedlich in die Bewertung der Wasserkörper eingehen [11]. Maßgeblichen Einfluss auf den biologischen Zustand haben die Vor-Ort-Parameter (v.a. Temperatur, Sauerstoffgehalt), die Nährstoffe, die Höhe der Mineralisation/Salzgehalt (z.B. elektrische Leitfähigkeit) sowie der Versauerungszustand.

Tabelle 2: Umweltqualitätsnormen (UQN) für Oberflächengewässer (Auszug) gemäß Oberflächengewässerverordnung OGewV [12]

| Stoff: | Einstufung: | Jahresdurchschnitt JD ($\mu\text{g/l}$) | Zulässige Höchstkonzentration ZHK ($\mu\text{g/l}$) |
|---------------------------|----------------------|---|--|
| Cd und seine Verbindungen | prioritär gefährlich | ≤ 0.08 (Klasse 1)* 0.08 (Klasse 2) 0.09 (Klasse 3) 0.15 (Klasse 4) 0.25 (Klasse 5) | ≤ 0.45 (Klasse 1)* 0.45 (Klasse 2) 0.6 (Klasse 3) 0.9 (Klasse 4) 1.5 (Klasse 5) |
| Hg und seine Verbindungen | prioritär gefährlich | 0,05 | 0,07 |
| Pb und seine Verbindungen | prioritär | 7,2 | keine Anforderungen |
| Ni und seine Verbindungen | prioritär | 20 | keine Anforderungen |

* je nach CaCO₃-Gehalt: Klasse 1: <40 mg CaCO₃/l Klasse 2: 40 bis <50 mg CaCO₃/l Klasse 3: 50 bis <100 mg CaCO₃/l Klasse 4: 100 bis <200 mg CaCO₃/l Klasse 5: >200 mg CaCO₃/l

Für 13 ausgewählte prioritär gefährliche Stoffe (u.a. Cadmium und Quecksilber sowie deren Verbindungen) sowie 20 prioritäre Stoffe (u.a. Blei und Nickel sowie deren Verbindungen) wurden sogenannte Umweltqualitätsnormen für Oberflächengewässer (UQN) festgelegt (*Tabelle 2*). Bei Überschreitung der verbindlich festgelegten UQN kann der ökologische Zustand allenfalls als „mäßig“ eingestuft werden.

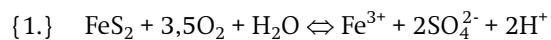
Von natürlichen Fließ- und Stehgewässern werden „künstliche oder erheblich veränderte Gewässer“ unterschieden (§ 28 WHG). Hierbei handelt es sich um anthropogen (z.B. Wasserkraft, Schifffahrt, Stadtentwicklung) morphologisch stark umgestaltete Gewässer. Bei diesen Gewässern ist das Bewirtschaftungsziel die Vermeidung einer Verschlechterung ihres ökologischen Potenzials und ihres chemischen Zustandes sowie der Erhalt bzw. die Erreichung des guten ökologischen Potenzials und guten chemischen Zustandes (§ 27 Abs. 2 WHG).

Bei der Einleitung von Grubenwässern des Altbergbaus in Vorfluter ist zu beachten, dass die eingestaunten Grubenwässer der gesättigten Zone als Grundwässer und nicht als Abwässer zu klassifizieren sind. Nach § 12 WHG können eine wasserrechtliche Erlaubnis oder Bewilligung versagt werden, wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind oder andere Anforderungen nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden. Bei der nachträglichen Festlegung von Anforderungen an die Einleitung von Grubenwässern aus dem Altbergbau ist zu berücksichtigen, dass diese Einleitungen meist bereits seit Jahrzehnten stattfinden und technisch nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand eingestellt werden können. Häufig erfolgte die Stilllegung incl. Flutung und Einleitung der Grubenwässer zumindest in Kenntnis der zuständigen Bergbehörden. Diese Art der Grubenentwässerung stellte vor Jahrzehnten den Stand der Technik dar und ist aktuell in der Regel nach wie vor erforderlich. Ein Verschluss der Einleitungsstollen würde zu Grundwasseranstiegen in den Bergwerken führen. Zu Grundwasseraustritten käme es auf der nächst höheren Stollensohle. Unter Umständen kann es auch zu unkontrollierbaren Wasseraustritten kommen, wenn die treibenden Kräfte (Höhe des Grundwasserstandes) die haltenden Kräfte (Damm, Stollenverschluss) übertreffen. Diese können Menschenleben gefährden oder erhebliche Schäden an Gebäuden, Straßen oder anderen Werten verursachen.

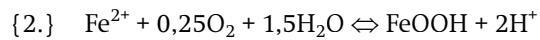
5. Naturwissenschaftliche Grundlagen

Dem Verfasser sind einige geflutete Bergwerke bekannt, deren Grubenwässer als Rohwässer für die Trinkwassergewinnung genutzt wurden. Dies umfasst sowohl ehemalige Bergwerke des Eisen- wie auch des NE-Erzbergbaus (Pb, Zn, Cu, Hg u. a. m.). Allerdings ist/war – zumindest im Rheinischen Schiefergebirge –

meist eine Aufbereitung durch Entsäuerung und/oder Enteisung und Entmanganisierung erforderlich. Daneben sind in der einschlägigen Literatur umfassend Untersuchungsergebnisse über kontaminierte Grubenwässer und damit einhergehende Gewässerkontaminationen veröffentlicht. Bereits [14] stellte fest, dass durch den Abbau und das Waschen der Erze die Bäche verunreinigt werden und die Fische sterben. Infolge der Oxidation sulfidischer Erze können saure Grubenwässer (acid mine drainage AMD) entstehen und erhebliche Austräge von Buntmetallen, Arsen, Aluminium, Eisen, Mangan, Sulfat etc. [9] verursachen:



Nach [15] findet die eigentliche Versauerung durch die anschließende Oxidation und Hydrolyse von Fe(II) statt:



Die überwiegende Zahl der Reaktionen, an denen Sauerstoff beteiligt ist, werden durch Bakterien katalysiert [16]. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist daher von der Populationsdichte und vom Nahrungsangebot abhängig. Auch bei der Sulfidoxidation besitzt die biologisch bedingte Oxidation große Bedeutung. Optimale Lebensbedingungen bestehen bei pH-Werten zwischen 2,5 und 3,5 [17]. Die aus der Eisenoxidation erhaltene Energie wird für Stoffwechselvorgänge genutzt [18]. Die Sulfid oxidierenden Bakterien *Thiobacillus thioporus* und *Thiobacillus novellus* weisen optimale Lebensbedingungen bei neutralen bis leicht alkalischen pH-Werten auf.

Die hydrochemische Beschaffenheit der Grubenwässer ist jedoch von vielen Faktoren abhängig [9], die wichtigsten sind:

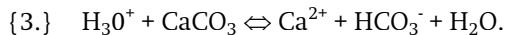
- das Vorhandensein sulfidischer Minerale und deren Oberfläche,
- Wasserwegsamkeit und -sättigung,
- Oxidationsmittel in gasförmiger und wässriger Phase (insbesondere Sauerstoff und Eisen),
- Umfang der unter Beteiligung von Bakterien erfolgten Oxidation (Art der Bakterien, Populationsdichte, Wachstum, Nährstoffe etc.),
- geochemisches Milieu (Temperatur, pH-Wert, Redox-Potential),
- chemische Aktivität,
- Pufferkapazitäten.

Ob saure Grubenwässer emittieren, ist von dem Verhältnis des säureproduzierenden Potentials zum Neutralisationspotential abhängig. [19] unterscheidet verschiedene Pufferbereiche, die in natürlichen Substraten nacheinander durchlaufen werden (*Tabelle 3*). Die Puffer werden sukzessive nacheinander verbraucht. Nach Verbrauch eines Puffers fallen die pH-Werte bis zum nächst wirksamen pH-Wert schnell ab [20].

Tabelle 3: Pufferbereiche natürlicher Böden [19]

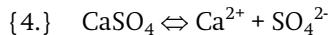
| Pufferbereich | pH-Werte | Puffersubstanz | Pufferreaktion |
|-----------------|-----------|---|---|
| Calciumcarbonat | 8,6 – 6,2 | Kalk (CaCO_3) | $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ |
| Silikat | 6,2 – 5,0 | primäre Silikate (Feldspäte, Glimmer u. a.) | $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ |
| Austauscher | 5,0 – 4,2 | Silikatische Restminerale (sekundäre Tonminerale) | $n(\text{AlOOH} + 0,5\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}) \rightleftharpoons [\text{Al}(\text{OH})_{3,5}]^{0,5n} + 0,5n\text{H}_2\text{O}$ |
| Aluminium | 4,2 – 3,8 | Al-Hydroxide, Tonminerale | $\text{AlOOH} + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Aluminium-Eisen | 4,2 – 3,0 | Tonminerale, Al-Hydroxide, Fe-Oxide | s. oben / s. unten |
| Eisen | < 3,0 | Fe-Oxide | $\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$ |

Bei der Bildung von sauren Grubenwässern finden verschiedene Puffer- und Folgereaktionen statt. Die gebildeten Reaktionsprodukte Acidität und Sulfat können in Speichermineralien wie Gips, Jarosite-Na, Schwertmannit festgelegt werden [21]. Bei der Reaktion saurer (Gruben-) Wässer mit carbonatischen Gesteinen werden die Protonen unter Bildung von Hydrogencarbonat gepuffert:



Dies kann zu hohen Hydrogencarbonatanteilen bei den Anionen führen.

Hohe Sulfatgehalte können neben der direkten Freisetzung aus der Sulfidoxidation auch auf die Lösung von Sekundär- oder Verwitterungsmineralien zurückgeführt werden:



Bei dieser Lösungsreaktion {4.} werden keine Protonen freigesetzt.

6. Bedeutung

Bereits 1556 weist Agricola [14] auf erhebliche Gewässerschäden durch den Bergbau hin. Das Umweltbundesamt [22] stellt ebenfalls fest, dass bei Zink, Cadmium, Kupfer, Nickel, Blei und Arsen auch der historische Bergbau einen erheblichen Anteil am Eintrag in Fließgewässer hat. Neben diesen punktuellen und diffusen Einträgen bestehen auch häufig Beeinträchtigungen der Hydromorphologie, da die Gewässer zur Energieerzeugung und Aufbereitung genutzt wurden.

In der Bewertung nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie wird wiederholt auf hohe Metallfrachten aus dem Altbergbau durch Punktquellen sowie diffuse Zuflüsse hingewiesen. Gemäß [22] betrug der Anteil des Schwermetalleintrags aus historischem Bergbau im Jahre 2005 von Cadmium rund 21 % des Gesamteintrags aus Punkt- und diffusen Quellen (9,2 kt/a). Der Anteil von Zink wird mit ca. 13 % (von 2755 kt/a) angegeben. Die Einleitungen aus histori-

schem Bergbau in Oberflächengewässer von Blei, Kupfer und Nickel betragen jeweils ca. 3 % des Gesamteintrags aus Punkt- und diffusen Quellen, der mit 263 kt/a (Blei), 461 kt/a (Kupfer) und 477 kt/a bestimmt wurde [22]. Bei Emissionen aus Altbergbau besitzen Chrom und Quecksilber keinen nachweisbaren höheren Anteil.

Der Eintrag erfolgt in gelöster Form, aber auch an Partikel gebunden oder als Schwebfracht. Die Anforderungen der UQN (Tabelle 2) werden dabei zum Teil erheblich überschritten. Ob dies jedoch im Einzelfall zu ökologischen und chemischen Beeinträchtigungen der Oberflächengewässer führt, ist stark von dem Abfluss der Vorfluter abhängig. So können Gewässer (Bäche) mit geringen Abflüssen bereits bei vergleichsweise niedrigen Frachten erheblich in ihrer ökologischen und chemischen Gewässergüte beeinträchtigt werden, während sich bei größeren Gewässern keine negativen Einflüsse auf die chemische und ökologische Gewässergüte ergeben müssen. Eine pauschale Beurteilung ist aufgrund von Analysen der Grubenwässer nicht möglich, vielmehr sind umfassende Bewertungen des Einzelfalles, die auch die Schüttungen sowie die Oberflächengewässer selbst umfassen, notwendig.

Prominente Beispiele für erhebliche Metallfrachten in Gewässer resultieren z. B. aus dem Freiberger (Sachsen) Altbergbau. Das Teilearbeitungsgebiet Freiberger Mulde hat mit 14 Prozent einen hohen Anteil an mit »gut« bewerteten Fließgewässer-Wasserkörpern [24]. Allerdings wurden in den Teilearbeitungsgebieten der Freiberger und Zwickauer Mulde vermehrte Überschreitungen der Umweltqualitätsnormen für spezifische Schadstoffe festgestellt. Insbesondere handelt es sich um Arsen, Zink, Cadmium und Kupfer, deren Konzentrationen meist infolge der beschriebenen Einleitungen/Emissionen des ehemaligen Bergbaus oberhalb der Umweltqualitätsnormen liegen [24]. In der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie im Teilearbeitungsgebiet der oberen Elbe (Elbestrom 1) werden die Anforderungen der Tochterrichtlinie am häufigsten überschritten. Beim Elbehochwasser 2002 lagen die Cadmium-Konzentrationen in der Elbe sogar kurzzeitig oberhalb der Qualitätsnorm der EU-Wa-

Tabelle 4: Schwermetallgehalte in Grubenwässern des Burgfreyer Stollens [25]

| Parameter | Einheit | Stollenwasser (Mittelwerte) | Geringfügigkeitsschwellenwerte [10] | UQN (Jahresdurchschnitt) [12] |
|-----------|---------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Ni | (µg/l) | 1.300 | 14 | 20 |
| Zn | (µg/l) | 3.000 | 58 | - |
| Co | (µg/l) | 620 | 8 | - |
| Cd | (µg/l) | 6,8 | 0,5 | ≤ 0,08 (Klasse 1)* 0,08 (Klasse 2) 0,09 (Klasse 3) 0,15 (Klasse 4) 0,25 (Klasse 5) |
| Pb | (µg/l) | 14 | 7 | 7,2 |

*: siehe Tabelle 2

serrahmenrichtlinie. Die für die Elbe zuständigen Ministerien gehen davon aus, dass wahrscheinlich die Ziele für Fließgewässer-Wasserkörper der Wasserrahmenrichtlinie in der Elbe und Mulde nicht erreicht werden. Als Gründe werden Emissionen und Einleitungen aus dem Altbergbau angegeben. Fazit: es liegt ein Grundwasserschaden vor, der eine weitreichende Kontamination der Oberflächengewässer bewirkt. Ein weiteres Beispiel stellen die Einleitungen des Tiefen Stollens (Burgfreyer Stollen) der Mechernicher Blei-Zink-Erzlagerstätte in den Veybach dar [24]. Infolge der Durchsickerung des Altbergbaus werden Schwermetalle – insbesondere Zink, Nickel, Cadmium und Kobalt – gelöst und in die Oberflächengewässer eingetragen (Tabelle 4). Die Geringfügigkeitsschwellenwerte [10] werden auch in diesem Fall z.T. erheblich überschritten. Das Staatliche Umweltamt Köln [25] sieht einen dringenden Sanierungsbedarf. Gemäß [25] sind die Schwermetallbelastungen des Veybachs und der Erft so hoch, dass eine Sanierung der Gewässerqualität des Veybachs und eine Verringerung der Schwermetallbelastung der Erft bis hin zum Rhein nur möglich ist, wenn der Schwermetalleintrag aus dem Stollen weitgehend abgestellt wird. Fazit: es liegt ein Grundwasserschaden vor, der eine weitreichende Kontamination der Oberflächengewässer bewirkt. Andererseits beschreibt [20] einen Grubenwasserabfluss im Hunsrück mit sauren pH-Werten (bis pH 2). Die Geringfügigkeitsschwellenwerte (Tabelle 2) der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [10] als Grenze, ab der ein Grundwasserschaden vorliegen kann, werden durch Sulfat sowie Spurenelemente (Arsen, Blei, Cadmium,

Tabelle 5: Anreicherungskoeffizienten in den Sedimenten (<20 µm) der Freiberger Mulde gegenüber der geogenen Hintergrundbelastung [23]

| Fluss | As | Cd | Cu | Pb | Zn |
|------------------|----|-----|----|----|----|
| Freiberger Mulde | 10 | 105 | 14 | 17 | 26 |

Cobalt, Kupfer, Nickel, Zink) zum Teil erheblich überschritten. Eine erhöhte Freisetzung von Schadstoffen findet ebenfalls statt, da die Schüttung bis mehrere l/sec beträgt. Fazit: es liegt ein Grundwasserschaden vor. Die hohen Aluminiumgehalte in Verbindung mit den sauren pH-Werten können dahingehend interpretiert werden, dass die umgebenden Gesteine eine nicht ausreichende Pufferkapazität besitzen und der wirksame Puffer der Eisen-Aluminiumpuffer ist.

Bei Einleitung der Grubenwässer der Tiefen Stollen in den Vorfluter kommt es infolge von Verdünnungseffekten zwangsläufig zur Vermischung, Neutralisierung und zur Fällung von Aluminium durch Bildung von Tonmineralien und Hydroxiden sowie von Eisen als amorphe Hydroxide. Mit erhöhten Aluminium- und Eisengehalten ist nur unmittelbar an den Einleistellen in den Vorfluter selbst zu rechnen. Trotz dieser Einleitung ist das Gewässer (3. Ordnung) im gesamten Verlauf mit dem ökologischen Zustand von „gut“ bewertet [11]. Ein Handlungsbedarf ergibt sich in Hinblick auf die Anforderungen an Oberflächengewässer nicht.

Aus den Metalleinträgen der ehemals bedeutenden NE-Metallerzbergbaureviere (Erzgebirge, Harz, Schwarzwald, Rheinisches Schiefergebirge etc.) kann es gegenüber der geogenen Hintergrundbelastung zu sehr hohen Metallgehalten in den Gewässersedimenten kommen. Beispielhaft beschreibt [23] erhebliche Anreicherungen von Cadmium, Arsen, Kupfer, Blei und Zink in den Sedimenten der Freiburger Mulde (Tabelle 5). Anreicherungen umweltrelevanter Stoffe in Gewässersedimenten können ein langfristiges Gefährdungspotential darstellen.

7. Schlussfolgerungen

Die in den stillgelegten gefluteten Bergwerken mobilisierten Schadstoffe sind in der Regel geogen und wurden nicht durch den Menschen eingebracht. Durch den Bergbau wurden sie jedoch geochemisch verfügbar gemacht, indem hydraulische Durchlässigkeiten geschaffen und die Oberflächen der vererzten Gesteine vergrößert wurden. Erst dadurch wurden die Mobilisierung und der Austrag in größerem Maße möglich. Gegenüber langfristigen geogenen Verwitterungsvorgängen kann es so zur Freisetzung erheblicher Schadstoffmengen in geologisch kurzen Zeiträumen kommen. Zudem fließt das verunreinigte Grundwasser nicht langsam und großflächig den Vorflutern zu und wird dort vielfältigen geochemischen („Reinigungs“-)Prozessen – wie Sorption, Fällung, Abbau, Vermischung etc. – ausgesetzt, sondern wird konzentriert mit hohen Gehalten/Frachten punktuell in die Vorfluter eingeleitet. Dies kann – insbesondere bei kleineren Gewässern – zur biologischen Verödung führen [14].

Eine pauschale Aussage, ob durch den ehemaligen Erzbergbau hinsichtlich des Grund- und/oder Oberflächenwasserpades eine schädliche Bodenverände-

rung entsteht, ist nicht möglich. Die Größe bzw. das Ausmaß des ehemaligen Bergbaus (Größe der Grubenfelder, Abbautiefe), die Mineralisation/Vererzung sowie das geochemisches Milieu haben maßgeblichen Einfluss auf die Beschaffenheit des Grundwassers. Außerdem sind die Frachten sowie die Leistungsfähigkeiten der Vorfluter, in die das Grubenwasser über die Tiefen Stollen eingeleitet wird, zu betrachten. Vereinfacht ausgedrückt werden kleine Gewässer bereits bei geringeren Frachten ökologisch und hydrochemisch beeinträchtigt, während größere Gewässer höhere Frachten verkraften können, ohne ökologisch geschädigt zu werden. Davon unabhängig weisen die Gewässer und Gewässersedimente der ehemals bedeutenden Erzbergbauregionen erhebliche Anreicherungen der bergbautypischen Stoffe auf. Allerdings erfolgte der Schadstoffeintrag über Jahrhunderte durch unterschiedliche Bergbautreibende (Verursacher) aus unterschiedlichen Gruben/Stollen, Halden und Aufbereitungsanlagen.

Die ehemaligen Bergwerksbetreiber sind überwiegend bzw. häufig nicht mehr vorhanden oder insolvent. Die Grundstückseigentümer mussten gemäß dem Allgemeinen Preußischen Berggesetz (1865) den Bergbau auf ihrem Grundstück dulden [5], sie befinden sich demnach in einer Opferposition. Grundlage für Sanierungsanordnungen stellt beim Altbergbau das Bundes-Bodenschutzgesetz mit seinen Verordnungen dar. Soweit die ehemaligen Bergwerksbetreiber oder deren Rechtsnachfolger noch rechtlich zur Sanierung verpflichtet werden können, sind ggf. weitergehende Anforderungen als gegenüber den Grundstückseigentümern möglich.

Literatur:

- [1] Steuer, H. & Zimmermann, U. (2000): Alter Bergbau in Deutschland. – Sonderheft von Archäologie in Deutschland: 127 S., Hamburg.
- [2] Kirnbauer, T. & Hucko, S. (2011): Hydrothermale Mineralisation und Vererzung im Siegerland. – In: der Aufschluss, Jg. 62, Juli-August 2011: S. 257–296, 40 Abb., 1 Tab., Heidelberg.
- [3] Bund (1980): Bundesberggesetz (BBergG). – Bundesberggesetz vom 13. Juli 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- [4] Bund (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderung und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz BBodSchG). – Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 30 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- [5] Pretor, A. & Rinn, I. (1964): Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland. – 478 S., Essen.
- [6] Konder, A. (1986): Berücksichtigung von Erfordernissen des Umweltschutzes in bergrechtlichen Betriebsverfahren. – Materialien zur Angewandten Geographie, Bd. 12: S. 44–50, Bochum.
- [7] Bund (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG) – Wasserhaushaltsgesetz vom 1. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert am 21. Januar 2013 (BGBl. I S. 95).
- [8] Cychowski, M. & Reinhardt, M. (2010): Wasserhaushaltsgesetz unter Berücksichtigung der Landeswassergesetze und des Wasserstrafrechts. – XXVII + 1304 S., München.
- [9] Wieber, G. [1999]: Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilber-Erzbergbaus an Beispielen des westlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Saar-Nahe-Senke: Hydraulik, hydrochemische Beschaffenheit und umweltgeologische Bewertung. – 250 S., Gießen.
- [10] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. – 33 S., Düsseldorf.
- [11] Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) [Hrsg.] (2011): Gewässerzustandsbericht 2010. – 222 S., Anl., Mainz.
- [12] Bund (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV). – BGBl. I S. 1429 vom 20. Juli 2011.
- [13] Beile, F. (1996): Wassergesetz für das Land Rheinland-Pfalz (Landeswassergesetz-LWG). – 542 S., Bonn.
- [14] Agricola, G. (1556): Vom Berg- und Hüttenwesen. – Reprint (1994): 610 S., München.
- [15] Pfeifer, S. & Nohlen, C. (2000): Pyritverwitterung und Gewässerversauerung – ein irreversibler Vorgang? – In: Bayerische Akademie der Wissenschaften [Hrsg.]: Bergbau-Folgeschäden und Ökosysteme. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, 20: S. 15–28, München.
- [16] Merkel, B. & Sperling, B. (1996): Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil. 1. – DVWK-Schr., 110: 288 S., Anh., Bonn.
- [17] Sengupta, M. (1993): Environmental impacts of mining: monitoring, restoration and control. – 494 S., Boca Raton.
- [18] Wood, A & Reddy, V. (1998): Acid mine drainage as a factor in the impacts of underground minewater discharges from grootvlei gold mine. – In: IMWA: Symposium on mine water and environmental impacts, proceedings volume 2: 387–398, Johannesburg.
- [19] Blümel, W.D. (1986): Waldversauerung Gefährdung eines ökologischen Puffers und Reglers. – In: Geogr. Rundschau, 38: S. 311–322, Braunschweig.
- [20] Wieber, G. (2003): Die Beschaffenheit von Grubenwässern des ehemaligen Erzbergbaus: hydrogeochemische Grundlagen und Praxisbeispiele aus dem westlichen Rheinischen Schiefergebirge. – In: Giessener Geol. Schr., 70: S. 21–57, Gießen.
- [21] Schöpke, R. & Preuß, V. (2012): Bewertung der Acidität von bergbauversauerten Wässern und Anwendung auf die Sanierung. – In: Grundwasser, 17: S. 147–156, Berlin.
- [22] Umweltbundesamt [Hrsg.] (2010): Wasserwirtschaft in Deutschland. Teil 2: Gewässergüte. – 116 S., Berlin.
- [23] Beuge, P. & Degner, T. (2000): Umweltgeochemische Belastungen durch den Bergbau im Erzgebirge – Bewertung und Lösungsansätze. – In: Bayerische Akademie der Wissenschaften [Hrsg.]: Bergbau-Folgeschäden und Ökosysteme: S. 103–113, München.
- [24] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen [Hrsg.] (2009): Bericht über die sächsischen Beiträge zu den Bewirtschaftungsplänen der Flussgebietseinheiten Elbe und Oder. – 191 S., Dresden.
- [25] Staatliches Umweltamt Köln [Hrsg.] (2004): Ergebnisbericht Erft – Wasserrahmenrichtlinie in NRW – Bestandserfassung. – 397 S., Köln.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr.-habil. Georg Wieber
Institut für Geowissenschaften, Hydrogeologie
Becherweg 21
55099 Mainz
E-Mail: wieber@uni-mainz.de