



Fachsektion Hydrogeologie e.V.

in der DGGV e.V.

Schriftenreihe Heft 4, 2023

Arbeitskreis Grubenwasser der FH-DGGV

Praxisleitfaden Grubenwasser

Teil 1: Beprobung und Vor-Ort-Untersuchung



Fachsektion Hydrogeologie e. V.

in der DGGV e. V.

Schriftenreihe Heft 4, 2023

Praxisleitfaden Grubenwasser

Teil 1: Beprobung und Vor-Ort-Untersuchung

Arbeitskreis Grubenwasser der FH-DGGV:

Diana Burghardt

Wilhelm G. Coldewey

Christian Melchers

Johannes Meßer

Michael Paul

Thomas Walter

Dominik Wesche

Sebastian Westermann

Georg Wieber

Christian Wolkersdorfer

Schriftenreihe der FH-DGGV, Heft 4

Herausgeber: Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e. V.
Emmy-Noether-Str. 17, 76131 Karlsruhe
www.fh-dggv.de

Redaktion: Maike Rüsgen
Layout: FH-DGGV e. V.
Druck: Druckerei Birghan, Neustadt/Wstr.
ISBN: 978-3-926775-78-8

Haftungsausschluss

Die Inhalte dieser Schrift dienen der fachlichen Information, Bildung und Weiterbildung. Diese Schrift ist das Produkt ehrenamtlicher Tätigkeit und wurde mit grotmoglicher Sorgfalt erstellt. Die FH-DGGV übernimmt keine Gewahrleistung für die Richtigkeit der Inhalte. Jegliche Haftung für Folgen aus der Anwendung dieser Schrift wird ausgeschlossen. Durch die Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln im konkreten Fall.

Umschlagabbildungen von Diana Burghardt (Aufnahmedatum 2018): Abschlag des Roten Grabens in Freiberg (obere Reihe), Reiche-Empfängnis-Stolln in Annaberg-Buchholz (u.l.), Tiefer Wolf-Stolln in Siebenlehn (u. r.).

**Vorwort des
Vorsitzenden der
FH-DGGV**

Die Fachsektion Hydrogeologie (FH) in der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung (DGGV) lebt von den Ideen, Initiativen und Aktivitäten ihrer rund 1200 Mitglieder aus der akademischen Forschung und der beruflichen Praxis. Hierbei sind insbesondere die aktuell acht ehrenamtlichen Arbeitskreise (AK) in der FH-DGGV zu nennen, die zu aktuellen und relevanten Themen der Hydrogeologie neue Methoden, Konzepte, Aktivitäten und konkrete Produkte entwickeln, beispielsweise Leitfäden, Fachbücher, Buchkapitel und sonstige Publikationen, aber auch Fortbildungskurse, Workshops und Websites.

Der seit 2015 bestehende AK Grubenwasser und dieser Praxisleitfaden Grubenwasser sind hierfür gute Beispiele. In vielen Teilen der Welt geht vom Bergbau eine erhebliche Gefahr für Mensch und Umwelt aus, insbesondere auch für die Wasserressourcen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Grubenwässer systematisch und mit einheitlichen Methoden zu beproben und zu charakterisieren. Hier kann der vorliegende Leitfaden einen wichtigen Beitrag leisten. Ich wünsche diesem Leitfaden daher eine weite Verbreitung und danke den Mitgliedern des Arbeitskreises für die geleistete Arbeit.

Prof. Dr. Nico Goldscheider

**Vorwort des
Arbeitskreisgründers**

Über die Probenahme von Grundwasser im Gelände gibt es umfangreiche Literatur sowie entsprechende Richtlinien. Hingegen ist die Probenahme von Grubenwasser komplex und bedarf häufig einiger Vorbereitungen sowie Ideenreichtum und Flexibilität in der Anwendung der verschiedenen Mess- und Probenahmeverfahren. Dieser Umstand ist begründet durch die geologischen, hydrogeologischen und bergbaulichen Situationen im Bereich der Probenahme. Dabei ist entsprechender Sachverstand gefragt, um eine Probe fachgerecht und repräsentativ zu entnehmen. Des Weiteren sind aufgrund der Grubenwasserqualität die materiellen Anforderungen an die Messgeräte und Probenahmegeräte zu berücksichtigen sowie die Sicherheitsrichtlinien zu beachten.

Der Arbeitskreis Grubenwasser der Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e. V. hat den Sachverstand seiner Mitglieder auf dem Gebiet der Probenahme von Grubenwässern in dem vorliegenden Leitfaden zusammengetragen.

Möge dieser Leitfaden dazu beitragen, die Qualität der Probenahme in der Montanhydrogeologie zu verbessern und somit repräsentative Ergebnisse hervorzubringen.

Glückauf

Prof. Dr. Wilhelm G. Coldewey

**Vorwort des
Arbeitskreissprechers**

Nach dem Glossar „Bergmännische Wasserwirtschaft“ aus dem Jahr 2017 ist der vorliegende „Praxisleitfaden Grubenwasser“ die zweite Veröffentlichung des Arbeitskreises Grubenwasser. Wie der Untertitel „Teil 1“ erkennen lässt, ist bereits ein zweiter Teil geplant. Im vorliegenden Teil 1 wird die „Beprobung und Vor-Ort-Untersuchung“ behandelt. Dabei werden konkrete Handlungsempfehlungen und Hinweise zur Thematik gegeben. Zudem dokumentiert der Praxisleitfaden die vielfältigen und langjährigen Erfahrungen der Mitglieder des AK Grubenwasser. Zudem trägt er dem Missstand Rechnung, dass bis heute keine allgemeinen Empfehlungen in der gesonderten Probenahme von Grubenwasser existieren. Derzeit setzt sich der AK Grubenwasser aus den folgenden Mitgliedern zusammen:

- Dr.-Ing. Diana Burghardt, TU Dresden
- Prof. Dr. Wilhelm Georg Coldewey, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Dr. Johannes Meßer, Emscher Wassertechnik GmbH, Essen
- Prof. Dr. Christian Melchers, TH Georg Agricola, Bochum
- Dr. Michael Paul, Wismut GmbH, Chemnitz
- Dipl.-Geol. Thomas Walter, MUV Saarland, Saarbrücken
- Dr.-Ing. Dominik Wesche, Geologischer Dienst NRW (Fachbereich Hydrogeologie, Bodenschutz)
- Dr.-Ing. Sebastian Westermann, TH Georg Agricola, Bochum
- Prof. Dr. Georg Wieber, LGB Rheinland-Pfalz, Mainz
- Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer, Tshwane University of Technology, Südafrika

Im geplanten Teil 2 des „Praxisleitfaden Grubenwasser“ soll der Schwerpunkt auf der Aus- und Bewertung von Grubenwasseranalysen liegen und dabei insbesondere die speziellen Anforderungen der hydrochemischen Beurteilung von Grubenwässern thematisieren.

Allen Mitgliedern des AK Grubenwasser gilt mein herzlicher Dank für die konstruktive und bereichernde Zusammenarbeit. Sie haben dazu beigetragen, dass mit dem „Praxisleitfaden Grubenwasser“ Teil 1 nunmehr erstmalig eine einheitliche Empfehlung zur Grubenwasserprobenahme vorliegt.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Wilhelm G. Coldewey und Herrn Dr.-Ing. Sebastian Westermann für das Redigieren des Leitfadens. Herrn Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer und Herrn Dr.-Ing. Dominik Wesche ist außerdem für die textliche Umsetzung gedankt.

Für den Arbeitskreis Grubenwasser

Prof. Dr. Christian Melchers

Dank

Von den folgenden, externen Fachleuten wurden Informationen aus ihren jeweiligen, speziellen Fachgebieten eingebracht:

- Dipl.-Ing. Tassilo Terwelp, ehem. Bezirksregierung Arnsberg, Abt. 6
- Michael Kirchner, ehem. Bezirksregierung Arnsberg, Abt. 6
- Dr. Bastian Reker, TH Georg Agricola, Bochum

Der Praxisleitfaden wurde durch die folgenden Fachkollegen begutachtet:

- Prof. Dr. Tobias Licha, Ruhr-Universität Bochum
- Prof. Dr. Maria-Theresia Schafmeister, Universität Greifswald

Ihnen gilt ein besonderer Dank.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	9
2.1	Begriffserläuterungen	9
2.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen	11
2.2.1	Betretungsberechtigung für die Probenahmestelle	11
2.2.2	Qualität von Grund- und Oberflächenwässern	13
3	Beprobung und Untersuchung von Grubenwässern	16
3.1	Lagebestimmung von Tagesöffnungen des Bergbaus	16
3.2	Auswahl der Probenahmestelle und deren Zugänglichkeit	20
3.3	Normen und Regelwerke für die Probenahme	22
3.4	Untersuchung von Grubenwässern	23
3.4.1	Geräte und Ausrüstung für die Probenahme und Abflussmessung	23
3.4.2	Besonderheiten bei der Probenahme in untertägigen Bergwerksanlagen ...	25
3.4.3	Vor-Ort-Untersuchung	27
3.4.4	Probenvolumina und Probenpräparation für die instrumentelle Analytik ..	33
3.4.5	Analytik weiterer Parameter	34
3.5	Empfehlungen zur Dokumentation	35
3.6	Probenbezeichnung	37
3.7	Abflussmessungen	38
4	Zusammenfassung	43
5	Quellenverzeichnis	44
5.1	Literatur	44
5.2	DIN	46
5.3	Regelwerke, Richtlinien	46
5.4	Gesetze, Verordnungen	47
6	Anhang	48
6.1	Parameterpaket	48
6.2	Beispiel einer Checkliste für die Wasserprobenahme	50

6.3	Relevante Normen und Regelwerke für die Untersuchung und Beprobung von Stollenwässern	52
6.4	Vorlage für ein Probenahmeprotokoll für Grubenwasser	56
6.5	Adressen der Bergbehörden in Deutschland.....	58
6.6	Fallbeispiele.....	59
6.6.1	Sachsen [Diana Burghardt]	59
6.6.2	Bayerische Pechkohlenmulde [Christian Wolkersdorfer]	64
6.6.3	Finnland [Christian Wolkersdorfer]	66

1 Einleitung

In vielen Gebieten Deutschlands wurde in den vergangenen Jahrhunderten intensiv Bergbau betrieben. Durch die damit einhergehende Massenverlagerung von geologischem Material hat der Mensch z. T. massiv in geodynamische Vorgänge eingegriffen und Verwitterungs-, Erosions- und Sedimentationsprozesse beschleunigt. Gleichzeitig können durch das Fördern der Rohstoffe geologische Barrieren aufgehoben werden und infolgedessen irreversible Veränderungen der Geosphäre auftreten (WIEBER 1994, WOLKERSDORFER 2008, YOUNGER et al. 2002).

Vor allem Steinkohle, Erze und Salz, aber auch Steine und Erden werden in untertägigen Bergwerken abgebaut. Für den Abbaubetrieb ist mit zunehmender Teufe eine Wasserhaltung erforderlich. Nach Einstellung des Bergbaus wird die Wasserhaltung oft aufgegeben und die untertägigen Hohlräume füllen sich dann mit Grund- und Grubenwasser. Dieses geschah in der Bundesrepublik Deutschland bis zur Einführung des Bundesberggesetzes (BBERGG 1980) in weit zurückliegenden Zeiten häufig unkontrolliert und ohne weitergehende Qualitätsanforderungen oder Überwachung. Das Wasser steigt dabei meistens bis auf das Niveau eines Wasserlösestollens an, von wo aus es im freien Gefälle an dem häufig im Talfesten befindlichen Stollenmundloch über Tage austritt und entweder direkt oder nach kurzem Fließweg in den Vorfluter entwässert.

Nach heutiger Rechtslage sind zur Einleitung von Grubenwässern in die Vorfluter wasserrechtliche Erlaubnisse erforderlich (WHG 2009). Dabei sind nach Inkrafttreten der entsprechenden Regelung im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und Bundesberggesetz (BBERGG 1980) konkrete Anforderungen an Menge und hydrochemische Beschaffenheit der einzuleitenden Wässer zum Schutz der Fließ- und Grundwässer zu beachten.

Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) sind die Mitgliedsstaaten verpflichtet, den ökologischen und chemischen Zustand ihrer Gewässer zu erfassen und zu beurteilen (EU-WRRL 2014/101/EU; UMWELTBUNDESAMT 2006). Für die Überwachung und Beurteilung der Qualität der oberirdischen Gewässer und Grundwässer sind in Deutschland die jeweiligen Bundesländer zuständig. Im Rahmen der hierzu erforderlichen Untersuchungen können zur Beurteilung potenzieller Belastungen zusätzliche Anforderungen im Rahmen von Monitoringprogrammen erforderlich werden. Dabei erfolgen die Festlegungen der zu überwachenden Parameter in der Regel auf Grundlage bergbehördlicher Betriebsplanzulassungen.

In Nordrhein-Westfalen beispielsweise wurde zwischen dem Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE), dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) und der RAG Aktiengesellschaft (RAG) die Errichtung

und Durchführung eines integralen Monitorings für den Grubenwasseranstieg in NRW vereinbart. Dieses soll in regelmäßigen Abständen mit den am Monitoring Beteiligten ggf. weiterentwickelt und angepasst werden kann (BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2020). Gleiches ist für den Grubenwasseranstieg im Saarland geplant.

Ziel dieses Leitfadens ist es, Erfahrungen aus der Praxis zu bündeln und Empfehlungen für Geländeuntersuchungen von Grubenwässern hinsichtlich der Quantität und Qualität zusammenzustellen. Dadurch soll die Vergleichbarkeit von Messergebnissen sichergestellt werden.

2 Grundlagen

2.1 Begriffserläuterungen

Nachfolgend sind einige wichtige bergmännische sowie hydrometrische Begriffe erläutert, die in diesem Praxisleitfaden verwendet werden.

Bergmännische Begriffe

Berechtsamsbuch	wird bei der zuständigen Behörde angelegt und geführt; hierin sind Erlaubnisse, Bewilligungen, Bergwerkseigentum und nach § 149 aufrechterhaltene Bergbauberechtigungen und deren Änderungen (durch Vereinigung, Teilung, Austausch oder Zerlegung) einzutragen. Die Eintragungen werden von Amts wegen vorgenommen (§ 75 BBergG).
Berechtsamskarte	wird bei der zuständigen Behörde angelegt und geführt; hierin sind die Felder, auf die sich die im Berechtsamsbuch genannten Bergbauberechtigungen beziehen, und deren Veränderungen sowie Baubeschränkungsgebiete einzutragen. Die Eintragungen werden von Amts wegen vorgenommen (§ 75 BBergG).
Grubenwasser	bergmännisch für alles Wasser, was mit Tief- oder Tagebauen in Kontakt stand oder steht
Grubenbau	bergmännisch für einen durch bergmännische Tätigkeit geschaffenen Hohlraum
Mundloch	bergmännisch für Tagesöffnung eines Stollens
Mündung	Ort des Zuflusses eines Stollenwassers in ein Fließgewässer
Pinge	1. Mulden- oder trichterförmige Vertiefung an der Tagesoberfläche, entstanden durch Zubruchgehen oberflächennaher untertägiger Grubenbaue („Tagesbruch“), 2. Oberirdischer Abbau oder Abgrabung
Rösche	1. Abflaufrösche: untertägiger Graben in Form einer rinnenartigen Vertiefung in der Sohle von horizontalen Grubenbauen zur Ab- oder Zuführung von Grubenwasser, 2. Stollenrösche: Stollen geringen Querschnitts zur Wasserführung, nach Inbetriebnahme meist nicht mehr befahrbar, 3. Tagesrösche:

übertägiger Wassergraben zur Ableitung von Grubenwasser aus einem Stollen (oft abgedeckt), 4. Wetterrösche: Aussparung im Versatz oder zwischen Versatz und anstehendem Gebirge zur Wetterführung

Schacht	meist senkrechter (seigerer), seltener auch schräger (tonnlägiger) Grubenbau, der das übrige Grubengebäude mit der Tagesoberfläche bzw. zwei oder mehrere Sohlen miteinander verbindet
Stollen	auch Stolln genannt, bergmännisch für einen streckenartigen horizontalen, von der Tagesoberfläche aus leicht ansteigend aufgefahrenen untertägigen Grubenbau zur Sicherung eines freien Wasserabflusses und der Bewetterung; je nach Funktion werden Entwässerungs-, Erb-, Wetter- oder Förderstollen unterschieden
Stollenwasser	bergmännisch für Grubenwasser, das aus einem Stollen im freien Gefälle ausfließt
Tagwasser	Oberflächenbürtiges Wasser, das einem Bergwerk über Poren- und Trennflächenhohlräumen sowie Tagesöffnungen (Schächte, Stollen, Bohrlöcher) zufließt

Hydrometrische Begriffe

Abfluss, Durchfluss (allgemein)	unter dem Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche sich bewegendes Wasser
Abflussrate, Durchflussrate, Volumenstrom (quantitativ)	Quotient aus Wasservolumen, das einen bestimmten Fließquerschnitt durchfließt und der dazu benötigten Zeit (messpunktbezogen)
Abfluss(mess)- querschnitt	ausgewählter Querschnitt eines Fließgewässers normal zur Hauptströmungsrichtung, in dem Fließgeschwindigkeiten zur Ermittlung des Abflusses bzw. Durchflusses bestimmt werden

Bewertungsgrundlagen

Grenzwert	in Gesetzen und Verordnungen durch den Gesetzgeber festgelegte Höchstkonzentrationen für natürliche Inhaltsstoffe, Wirkstoffrückstände und Umweltkontaminanten. Sie unterliegen naturwissenschaftlichen und ökonomischen Kriterien und werden durch politische Prozesse bestimmt. Grenzwerte sind einzuhalten; bei Nichteinhaltung drohen Sanktionen
Richtwert	Messwert, der einzuhalten ist und nach dem man sich richten soll. Es handelt sich dabei um eine nachdrückliche Empfehlung. Ein Richtwert kann Toleranzgrenzen haben, in denen u. a. Messungenauigkeiten enthalten sind. Handelt man ohne triftigen Grund gegen Richtwerte kann dies unter Umständen fahrlässig oder grob fahrlässig sein
Schwellenwert	auch Prüfwert genannt; stellt eine Schadstoffkonzentration dar, die der Beurteilung über weitere Untersuchungen oder Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen dient. In der Regel beziehen sich diese Werte auf bestimmte Nutzungen und Gefährdungspfade. Bei Überschreitung kann im Einzelfall ein nicht tolerierbares Risiko bestehen

Weitere Begriffe finden sich im „Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft“ (BURGHARDT et al. 2017).

2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

2.2.1 Betretungsberechtigung für die Probenahmestelle

Grundsätzlich ist die Entnahme von Schöpfproben aus Oberflächengewässern, und folglich auch an Grubenwasseraustritten, in der Bundesrepublik Deutschland genehmigungsfrei. Dies bedeutet, dass die Entnahme von Wasserproben zwischen Stollenmundloch und aufnehmendem Vorfluter in der Regel ohne Genehmigung möglich ist. Bei Privatgrundstücken sind allerdings etwaige Betretungsbeschränkungen zu beachten und ggf. die Grundstückseigentümer zu kontaktieren. Bei Privatgrundstücken ist regelmäßig das Einverständnis der Grundstückseigentümer einzuholen (§123 StGB). In öffentlich-rechtlicher Hinsicht können Betretungsverbote bestehen. Zudem kann das Betreten auch dann genehmigungspflichtig sein, wenn z. B. die zuständigen Behörden zur Abwehr von Gefahren, die von untertägigen Hohlräumen verursacht werden, oder aber zum Schutze der Natur ein zeitweiliges oder dauerhaftes Betretungsverbot ausgesprochen haben. In einigen

Bundesländern (z. B. Sachsen) kann die Probenahme jedoch eine behördliche Aufgabe darstellen, die keiner ausdrücklichen Betretungsberechtigung des Grundeigentümers bedarf.

Während des laufenden Betriebs von Bergwerken unterliegen insbesondere untertägige Grubenbaue den Bestimmungen des Bergrechts (BBERGG 1980), für deren Umsetzung die Bergbehörden der Länder (Anhang 6.5) zuständig sind. An der Oberfläche frei austretendes Grubenwasser entstammt jedoch meistens Grubenbauen, die bereits vor Inkrafttreten des BBergG (1980) stillgelegt wurden. Somit sind diese dem Altbergbau zuzuordnen und die Bergaufsicht nach BBergG (1980) gilt damit nicht.

Zuständigkeiten für den Altbergbau werden in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich gehandhabt. So gilt z. B. in Sachsen die Sächsische Hohlraumverordnung (SÄCHSHOHLRVO 2012), nach der das Sächsische Oberbergamt die zuständige Polizeibehörde für die Abwehr von Gefahren aus dem Untergrund darstellt. Auch in Nordrhein-Westfalen wird die ordnungsrechtliche Zuständigkeit für den Altbergbau im Ordnungsbehördengesetz NRW (OBG NRW 1980) auf die Bergbehörde übertragen. In anderen Ländern wie z. B. Hessen existiert keine spezielle Regelung für den Altbergbau und sonstige unterirdische Hohlräume. Dort ist dann in der Regel die Ortspolizeibehörde zuständig. Besonderen Bestimmungen unterliegen die Zuständigkeiten für die Bewältigung der Hinterlassenschaften des Staatsbergbaus der ehemaligen DDR. So wurde nach der deutschen Wiedervereinigung die Wismut GmbH mit der Sanierung und Nachsorge des vormaligen sowjetisch-ostdeutschen Uranbergbaus in Sachsen und Thüringen betraut. Die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) ist neben der Sanierung des ostdeutschen Braunkohlenbergbaus zwischenzeitlich auch für die Sicherung und Verwahrung untertägiger Grubenhohlräume von im Zuge der deutschen Wiedervereinigung stillgelegten Kali-, Spat- und Erzbergwerke im Osten Deutschlands zuständig.

Es handelt sich in den vorgenannten Fällen nicht um Altbergbau im Sinne von Bergbau ohne Rechtsnachfolger. Der Sanierungsauftrag für die Wismut GmbH und LMBV ist auf all jene Betriebe beschränkt, die 1990/1991 geschlossen wurden. Sämtlicher schon vorher stillgelegter/auflässiger Bergbau – von besonderer Bedeutung ist hier der auf Erz und Spat – unterliegt wie überall sonst in Deutschland den Landesbestimmungen für Altbergbau, in Sachsen der SÄCHSHOHLRVO (2012).

Häufig liegen bei den Bergbehörden und den Betreibern Unterlagen (u. a. Risswerke) über Lage und Zustand von zu beprobenden Stollen vor. Auch die Frage, ob zur Probenahme an einem Stollen eine eigene Betretungserlaubnis erforderlich und wer dafür zuständig ist (Bergbehörde, Ortspolizeibehörde oder z. B. auch die Naturschutzbehörde), kann in der Regel mit der Bergbehörde geklärt werden.

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass das unbefugte Befahren von Stollen oder Schächten im Allgemeinen einen Straftatbestand darstellt. Darüber hinaus besteht Untertage auch durch Grubengase und mitunter geringer Sauerstoffkonzentrationen ein nicht kalkulierbares Gesundheitsrisiko bei der Befahrung von Stollen des Altbergbaus. Bei der Probenahme müssen im Übrigen die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften sowie örtliche Vorschriften beachtet werden.

2.2.2 Qualität von Grund- und Oberflächenwässern

Nach Inkrafttreten der Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL 2014/101/EU) und der Grundwasserrichtlinie (EU-GWRL 2014/118/EU) mussten die dort festgelegten Vorgaben durch die Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland erfolgte dies durch die Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2009) und die Verordnungen zum Schutz der Oberflächengewässer (OGEWV 2016) und des Grundwassers (GRWV 2010). Dabei soll das Ziel eines „guten Zustandes“ für alle Oberflächen- und Grundwasserkörper durch Maßnahmenprogramme und Bewirtschaftungspläne bis 2027 in drei Bewirtschaftungszyklen erreicht werden. Damit müssen die zuständigen Wasserbehörden der Länder alle sechs Jahre den quantitativen und qualitativen Zustand der Gewässer bewerten und, falls erforderlich und verhältnismäßig, Bewirtschaftungspläne mit geeigneten Maßnahmen zur Verbesserung des Zustandes der betroffenen Gewässer erstellen. Zur Beurteilung der chemischen Qualität von Oberflächengewässern und Grundwasser werden die entsprechenden Umweltqualitätsnormen (UQN) der OGewV (OGEWV 2016) und die Schwellenwerte der GrwV (GRWV 2010) herangezogen (Tab. 1). Ausnahmen bestehen allerdings nach der WRRL für erheblich veränderte Wasserkörper. Diese sind in ihrer Struktur oder ihrem chemischen Zustand so stark verändert, dass die Ziele der WRRL für diese mit verhältnismäßigen Mitteln nicht mehr erreichbar sind.

Zur Beurteilung von Verunreinigungen für das Grundwasser hat die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) eingeführt (LAWA 2004) und 2016 neugefasst (LAWA 2017). Das den Geringfügigkeitsschwellenwerten zugrundeliegende Konzept betrachtete ursprünglich parameterspezifisch die Konzentrationsschwelle, unterhalb derer eine punktuelle Einleitung in das Grundwasser als unbedenklich angesehen werden kann. Dabei definiert die LAWA die Geringfügigkeitsschwelle „als Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden“ (LAWA 2004 und 2017). Inzwischen wurden die Geringfügigkeitsschwellenwerte wegen der verzögerten Umsetzung der GWRL in nationales Recht auch zur Beurteilung der Wasserqualität von

Grundwasserkörpern herangezogen, wie z. B. im Internationalen Bewirtschaftungsplan für die Ems (NLWKN 2009; FGE Ems 2010).

Bei Überschreiten der GFS-Werte besteht noch keine zwingende Notwendigkeit, Maßnahmen zu ergreifen. Vielmehr ist zu prüfen, ob die gemessenen Konzentrationen auf regional erhöhte Hintergrundwerte (HGW) zurückzuführen sind. Dazu hat der Bundesländer-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) – bestehend aus den Staatlichen Geologischen Diensten und der Bundesanstalt für Geowissenschaften – eine bundesweite Untersuchung durchgeführt (WAGNER et al. 2014) und die Daten flächendeckend über einen Web-Map-Service bereitgestellt (<https://services.bgr.de/grundwasser/hgw>). Erst bei Überschreiten des Hintergrundwertes ist zu prüfen, ob und gegebenenfalls welche Maßnahmen zur Reduzierung des durch die Grubenwassereinleitung verursachten Eintrags durchzuführen sind (BLA-GEO und LAWA 2015, Abb. 1). Dies gilt auch für Oberflächengewässer.



Abb. 1: Verfahrensschema der wasserwirtschaftlichen Prüfung bei Überschreitung von Schwellenwerten im Grundwasser (GFS: Geringfügigkeitsschwellenwert; HGW: Hintergrundwert; aus BLA-GEO und LAWA 2015).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei Grubenwasser den Schwebstoffen mitunter besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist, da die potenziell toxischen Metalle an Schwebstoffen sorbieren können. Daher kann es in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung relevant sein, filtrierte und unfiltrierte Proben für die (Semi-)Metallkonzentrationen zu nehmen und zu analysieren. Während beispielsweise für die chemisch-thermodynamische Modellierung filtrierte Proben verwendet werden müssen, ist für den Schadstoffanfall in einer Grubenwasserreinigungsanlage die unfiltrierte Wasserprobe relevant. Prinzipiell unterscheidet sich die Probenahme nicht von der in diesem Leitfaden geschilderten, außer dass noch ein zusätzliches Probegefäß für die unfiltrierte Wasserprobe zu nehmen ist.

Tab. 1: Zusammenstellung von Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS) für das Grundwasser nach LAWA (2017), Schwellenwerten für das Grundwasser nach GRWV (2010) sowie der Vorschläge für Umweltqualitätsnormen für das Oberflächenwasser zur Fortschreibung der OGEWV (2016) und WENZEL et al. (2015).

Schadstoff	Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) Grundwasser (LAWA 2017)	Schwellenwerte Grundwasser (GRWV 2010)	Umweltqualitätsnorm (UQN) Oberflächenwasser (OGEWV 2016)	
			ZHK-UQN zulässige Höchst- konzentration	JD-UQN zulässige Jahres- durchschnitts- konzentration
	β µg/L	β µg/L	β_{\max} µg/L	β_{JD} µg/L
As	3,2	10	–	1,3
Cd	0,3	0,5	0,45 – 1,5 ²	0,08 – 0,25 ²
Cu	5,4	–	2,4 ¹	1,1 ¹
Cr	3,4	–	3,4 ¹	3,4 ¹
Zn	60	–	33 ¹	10,9 ¹
Ni	7	–	34	4
Pb	1,2	10	14	1,2
Hg	0,1	0,2	0,07	–
U	–	–	3,4 ¹	0,44 ¹
Se	3	–	–	3

¹ Werte in Diskussion für Fortschreibung OGEWV; WENZEL et al. (2015); ² CaCO₃-Härte-abhängig, Klasse 1 – Klasse 5

JD: zulässige Jahressdurchschnittskonzentration; ZHK: zulässige Höchstkonzentration

3 Beprobung und Untersuchung von Grubenwässern

3.1 Lagebestimmung von Tagesöffnungen des Bergbaus

Das Bundesberggesetz (BBERGG 1980) verpflichtet den Bergbauunternehmer für jeden Gewinnungsbetrieb und untertägigen Aufsuchungsbetrieb ein Risswerk in zwei Ausführungen anzufertigen und fortzuschreiben. Darin ist das Grubenbild ein wichtiger Bestandteil. Ein Exemplar des Risswerkes ist bei der zuständigen Behörde einzureichen, die es dauerhaft aufzubewahren hat (§ 63 ff BBERGG). Weiterhin hat die zuständige Behörde ein Berechtsamsbuch und eine Berechtsamskarte anzulegen und zu führen (§ 75 BBERGG). Die zuständige Behörde hat Jedermann Einsicht zu gewähren, der ein berechtigtes Interesse nachweisen kann. Obwohl die Risse von der zuständigen Behörde vorgehalten werden, verbleiben sie im Eigentum der Unternehmer. Für den Bereich des Altbergbaus ist von Bedeutung, dass das Allgemeine Berggesetz für die Preußischen Staaten (ABG) vom 24. Juni 1865 (PRGS. S. 705) in § 72 erstmals eine gesetzliche Verpflichtung des Bergwerksbesitzers begründet hat, ein Grubenbild durch einen von der zuständigen Behörde anerkannten Markscheider anfertigen und nachtragen zu lassen (§ 64 Abs. 1 BBERGG).

In den Grubenrisse sind die Stollen und Schächte lokalisiert. Manche Bergbehörden haben auf Grundlage der Risse Übersichtskarten mit Tagesöffnungen zusammengestellt und z. T. auch veröffentlicht. Allerdings erlaubt diese Darstellung keine parzellenscharfe Zuordnung. Einschränkungen ergeben sich dahingehend, dass vor Inkrafttreten des BBergG gerade von Bergbaubetrieben, die nicht dem Bergrecht unterlagen, die Grubenrisse nicht oder nicht mehr vorliegen. Außerdem können durch äußere Einflüsse (z. B. Krieg, Brände) die vorgelegten Risse nicht mehr vorhanden sein. Darüber hinaus liegen z. T. auch bei den jeweils zuständigen Wasserbehörden Karten mit (u. a. bergbaulichen) Einleitstellen vor. Eine gute Quelle für historische Risswerke sind oftmals lokale Bergwerksvereine und Museen mit ihren Archiven.

Weiterhin gibt es veröffentlichte topographische, geologische und lagerstättenkundliche Karten, in denen Bergwerksanlagen inklusive Stollen und Schächte kartiert und dargestellt sind (Abb. 2). Außerdem gibt es umfangreiche Publikationen zur Geschichte, Ausbildung und Bedeutung des lokalen und deutschlandweiten Bergbaus (STEUER UND ZIMMERMANN 2000), die Hinweise auf mögliche Probenahmeorte geben können. Diese Publikationen lassen sich über Literaturrecherchen über die folgenden Plattformen auffinden:

- Bibliothek und Archiv der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
<https://bgr.ibs-bund.de>

- Fachinformationsdienst Karten der Staatsbibliothek zu Berlin, Preußischer Kulturbesitz:
<https://kartographie.staatsbibliothek-berlin.de>
- Karlsruher Virtueller Katalog
<https://kvk.bibliothek.kit.edu>
- Rechercheportal Technische Informationsbibliothek (TIB), Leibniz Universität Hannover
www.tib.eu
- TU Bergakademie Freiberg
<https://katalog.ub.tu-freiberg.de>
- Montanuniversität Leoben
<https://bibliothek.unileoben.ac.at>
- Montandok des Deutschen Bergbau-Museums (DBM)
www.montandok.de
- Bibliothek der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum (THGA)
<https://webopac.thga.de>

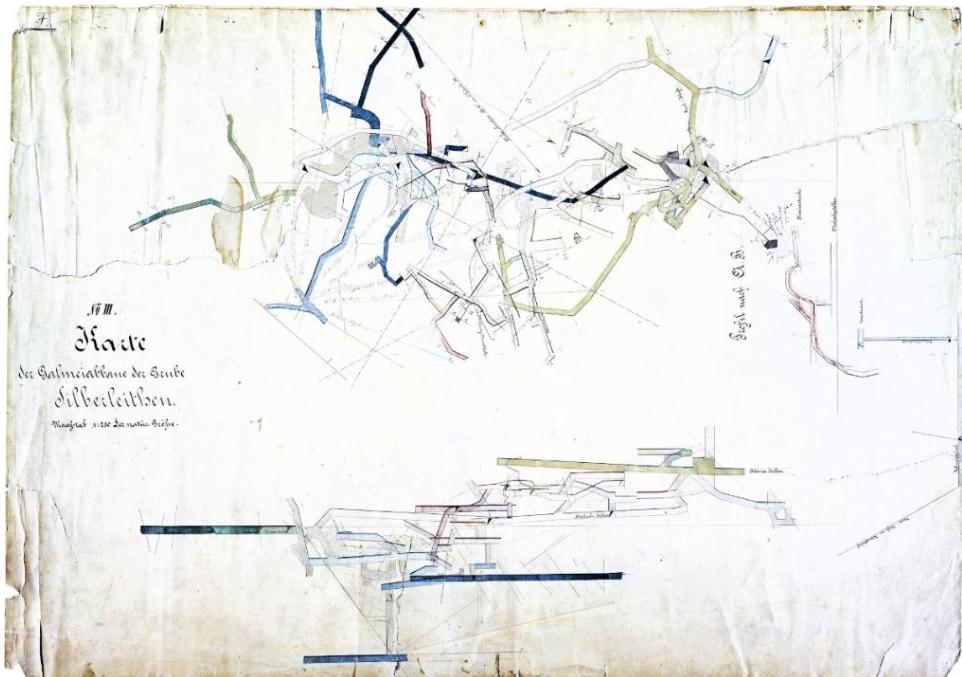


Abb. 2: Beispiel einer historischen, lagerstättenkundlichen Karte (ehem. Berghauptmannschaft Innsbruck, Archiv-Nr. BHR 020).

Eine moderne Möglichkeit zur Erfassung von Bergbaurelikten stellen satellitengestützte Aufnahmen dar. Im Jahr 1998 wurde von der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumorganisation ESA der Aufbau eines umfassenden europäischen Erdbeobachtungsprogramms beschlossen. Seit 2014 ist das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (bis 2012: Global Monitoring for Environment and Security, GMES) in Betrieb und garantiert seitdem einen freien Datenzugang zu aktuellen Informationen für umwelt- und sicherheitsrelevante Fragestellungen. In Deutschland ist das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) für Copernicus verantwortlich.

Copernicus betreibt sechs eigene Satellitenfamilien, die Sentinels („Wächter“), welche die Erde und Atmosphäre erfassen und somit wichtige Daten für Klimaschutz, nachhaltige Entwicklung, Ernährungssicherheit und zum Zustand der Ozeane liefern. Weitere kommerzielle und nationale Anbieter tragen ihre Daten als „beitragende Missionen“ zu den Copernicus-Diensten bei (DLR 2020). Copernicus stellt damit die Nachfolge des Satelliten Envisat (Environmental Satellite) dar, der von der ESA im Jahr 2012 außer Dienst gestellt wurde.

Für den Bereich des (Alt-)Bergbaus bietet der Beobachtungssatellit Sentinel-2 kontinuierliche hochauflösende, multispektrale Aufnahmen im optischen Bereich und nahen Infrarot. Dieser wurde am 23. Juni 2015 in Betrieb genommen und wird seit März 2017 durch einen zweiten, identischen Beobachtungssatelliten unterstützt. Zusätzlich betreibt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) seit 2010 den Erderkundungssatelliten TanDEM-X, der gemeinsam mit dem Satelliten TerraSAR-X mittels SAR (Synthetic Aperture Radar) die Erdoberfläche stereographisch vermisst. Deren hochauflösende Sensoren ermöglichen es, mittels Radarinterferometrie Bewegungen der Erdoberfläche (vertikal, lateral) in bergbaulich geprägten Regionen zu ermitteln.

Bergbaurelikte lassen sich ebenfalls mittels LiDAR-Daten (Light Detection and Ranging) erfassen. Diese sind für die digitale Analyse und Kartierung von geomorphologischen Kleinformen gut geeignet (Abb. 3). Die daraus entwickelten digitalen Geländemodelle (DGM) erlauben die Darstellung und Auffindung verschiedenster natürlicher und anthropogener Merkmale wie Pingen, Tagesbrüche, Stollenmundlöcher, Schächte sowie Halden (KLÖCKNER 2019, MACLEOD 2010).

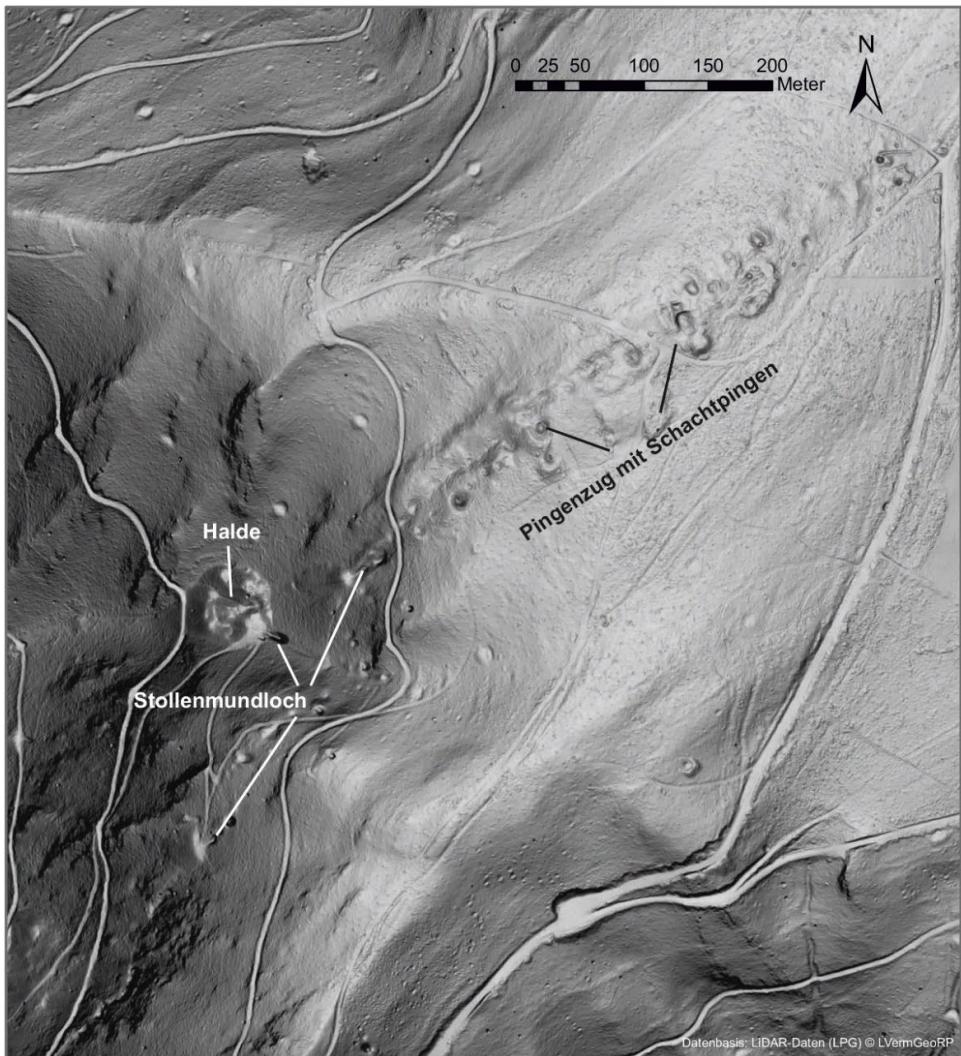


Abb. 3: Digitales LiDAR Geländemodell mit erkennbarem Bergbaustrukturen (LANDESVERMGEOPR).

Eine der wichtigsten Methoden ist jedoch die Geländebegehung, nachdem durch die Recherche historischer Dokumente zunächst die potenziellen Schächte oder Stollen lokalisiert wurden. Dies kann sich, je nach Größe des Untersuchungsgebiets, über Tage oder Wochen erstrecken, da die alten Stollenmundlöcher nicht mehr erkennbar, Pingen bzw. Pingenzüge bis zur Unkenntlichkeit überwachsen sind oder mit Schutt verfüllt wurden. Mitunter kann der Grubenwasseraustritt mittels physiko-chemischer Methoden lokalisiert werden. Dazu wird die elektrische Leitfähigkeit oder Temperatur des Grubenwasserabflusses stromaufwärts gemessen und im Bereich der stärksten Änderung nach dem Stollenmundloch gesucht. Auch luftgestützte geophysikalische Methoden haben

sich als vorteilhaft erwiesen, um Grubenwasseraustritte zuverlässig zu lokalisieren (z. B. Temperaturmessung mittels Infrarot-/Wärmebildkamera; ACKMANN 2003).

3.2 Auswahl der Probenahmestelle und deren Zugänglichkeit

In der Regel sollen durch die Beprobung des Grubenwassers potenzielle Einflüsse auf die Qualität des Vorfluters untersucht werden. Oftmals gestaltet sich in der Praxis die Festlegung der repräsentativen Probenahmestelle schwierig. So kann das eigentliche Stollenmundloch aufgrund nicht herstellbarer Personensicherheit nicht erreichbar sein (Abb. 4-1) oder es werden unterirdische Kanäle genutzt, um das Grubenwasser unterhalb des Wasserspiegels abzuleiten (Abb. 4-2). Ebenso können technisch eingerichtete Abschläge die repräsentative Probenahme erschweren (Abb. 4-3). Hochwasser kann eine Überflutung von Stollenwassereinmündungen zur Folge haben (Abb. 4-4). Weiterhin kann auf dem Fließweg bis zur Mündung in den Vorfluter eine Beschaffenheitsänderung erfolgen, insbesondere dann, wenn das Gerinne mit Eisenschlämmen oder organischem Material gefüllt ist (Abb. 5-1 und 5-2).



1



2



3



4

Abb. 4: Schwer zugängliche Stollenmundlöcher in der Freiberger Mulde (1 und 4); Zuflüsse unterhalb des Wasserspiegels (2: Kreßsieper Erbstollen, Sprockhövel) und über unterirdisch verlegte Rohre, an denen aufgrund der baulichen Gegebenheiten keine Probenahme möglich ist (3: Sonnenscheiner Stollen, Bochum).



Abb. 5: Veränderung von Grubenwässern durch Eisenschlamm (1: Von Braut-Stollen, Hattingen. 2: Pauline Erbstollen, Essen-Werden), durch organisches Material (3: Roter Graben in der Freiberger Mulde) oder Verdünnung durch zu hohe Wasserstände im Vorfluter (4: Roter Graben in der Freiberger Mulde).

Diese Praxisbeispiele zeigen, dass die Zugänglichkeit des Stollenmundloches und damit die Auswahl einer repräsentativen Probenahmestelle von wesentlicher Bedeutung ist. Daher sollte in den Unterlagen bzw. Datenblätter zu den Stollenmundlöchern die Probenahmestelle durch exakte Koordinaten (Hoch- und Rechtswert einschließlich geodätischem Datum), Fotos und einer Lagebeschreibung eindeutig lokalisierbar sein (Anhang 6.4). Je nach Fragestellung und Zugänglichkeit ist es empfehlenswert, mehrere Stellen für eine repräsentative Grubenwasserprobenahme festzulegen, z. B.:

- an den Austrittsstellen des Grubenwassers,
- vor der Mündung des Grubenwassers in den Vorfluter,
- im Vorfluter vor dem Zufluss des Grubenwassers (oberstromig) und
- im Vorfluter nach dem Zufluss des Grubenwassers (unterstromig).

Der unterstromige Abschnitt des Grubenwasserzuflusses im Gewässer wird Einmischstrecke genannt. Eine alleinige Betrachtung des Vorfluters durch dessen Beprobung ober- und unterstromig der Stollenwassereinmündung hat sich in der Praxis in vielen Fällen als wenig aussagefähig erwiesen. So kann bei der unterstromigen Beprobung die Festlegung der Einmischstrecke große Unsicherheiten mit sich bringen (DIN EN ISO 5667-6, Anhang A; WOLKERSDORFER 2021). Die Einmischstrecke ist abhängig vom Volumenverhältnis zwischen Gruben- und Flusswasser, der Art der Strömung (laminar, turbulent), der Gewässergeometrie (Breite, Tiefe, Gleit- und Prallhangsituations) und der Fließgeschwindigkeit. In der Praxis ermittelt sich die Einmischstrecke als das 20- bis 50-fache der Breite des Vorfluters. Auch durch größere Dichteunterschiede können sich größere Einmischstrecken ergeben. In Fällen, bei denen das Volumen des eingeleiteten Grubenwassers sehr klein im Verhältnis zum Durchflussvolumen des betroffenen Vorfluters ist, ist eine Bilanzierung des Grubenwassereinflusses auf Basis einer alleinigen ober- und unterstromigen Beprobung im Vorfluter (z. B. Elbe bei Königstein, Inn bei Schwaz) nicht sinnvoll.

Grundsätzlich ist bei jeder Probenahme aus einem Fließgewässer sicherzustellen, dass die Probenahme aus dem gut durchmischten Hauptstrom ohne Sedimentanteile erfolgt. Optimal ist es, die Probe aus einer Tiefe von 30 cm unter der Oberfläche zu entnehmen. Andernfalls hat die Probenahme aus der mittleren Tiefe zwischen Sohle und Oberfläche zu erfolgen (DIN EN ISO 5667-6). Probenahmestellen sind unterstromig anzulaufen, um einen Eintrag von aufgewirbeltem Sediment zu verhindern.

3.3 Normen und Regelwerke für die Probenahme

Für die Beprobung von Grubenwässern und die Bestimmung von Vor-Ort-Parametern wird auf die geltenden Regelwerke zur Probenahme aus Gewässern zurückgegriffen. Eine auf vielen Jahren basierende Beschreibung der Probenahmen von Grubenwasser haben MCLEMORE et al. (2014) gegeben, die im Wesentlichen auf den Erfahrungen des US Geological Survey beruht. Die Analytik von Beschaffenheitsparametern (Hauptkationen und -anionen, Metalle und Arsen) erfolgt nach den Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Empfehlungen zur Durchführung von Abflussmessungen sind vom DVWK publiziert (Anhang 6.3).

Für den aktiven Bergbau haben viele Bergwerksbetriebe ihre eigenen Probenahmeverordnungen. Eines der umfangreichsten Regelwerke ist das der LMBV, das

seit Jahren stets auf den neuesten Stand gebracht wird und dafür Sorge trägt, dass die Probenahme unter nachvollziehbaren Rahmenbedingungen abläuft (LMBV 2019).

3.4 Untersuchung von Grubenwässern

3.4.1 Geräte und Ausrüstung für die Probenahme und Abflussmessung

Für eine Probenahme zur Untersuchung von Grubenwässern werden im Folgenden die üblicherweise benötigten Gerätschaften zusammengestellt. Weitere Geräte und Gerätezusammenstellungen finden sich in den genannten Regelwerken (LAWA 1991 [Pegelvorschriften für Oberflächengewässer], LAWA 1995 [Quellen], DVWK 1982 [Probenahme], DVWK 1992 [Untersuchungsumfang], DVGW 2010 [Probeentnahme]):

- Lageplan, Karte, Navigationsgerät/GPS (Bestimmung des Rechts- und Hochwertes einschließlich geodätischem Datum),
- Feldmessgeräte mit (vorher kalibrierten) Messsonden für elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Sauerstoff, pH-Wert und Redox-Spannung, möglichst mit Messzelle zum Einhängen der Sonden (Tab. 2) und Ersatzbatterien,
- Titrator, Büretten, pH-Meter oder Indikatoren zur Bestimmung der Säurekapazität und Basenkapazität,
- ggf. Trübungsmessgerät,
- Spritzflasche mit destilliertem Wasser und Ersatzkanister,
- Feldkolorimeter für die Eisenbestimmung,
- Bechergläser und Probenflaschen,
- Einwegspritzen mit Spritzenvorsatzfilter (Membranfilter mit einer Porengröße von $\leq 0,45 \mu\text{m}$ oder $0,2 \mu\text{m}$) bzw. Vakuumfiltrationseinheit,
- Eimer oder Messbecher mit Messskalierung, 5 – 10 L,
- Probenahmeprotokoll (Anhang 6.4),
- Analoges oder digitales Feld- oder Geländebuch (langfristige Dokumentation),
- Kühlboxen mit Kühlakkus und Flaschensätzen für die Probenahme (ggf. vorbereitet und vorbeschriftet),
- Schöpfbecher zur Probenahme aus geringen Tiefen,
- Schöpfgerät zur Probenahme aus größeren Tiefen, ggf. Seil mit Karabinerhaken,
- Einweghandschuhe,
- Werkzeug für Kleinreparaturen,
- Taschen-, Stirn- oder Grubenlampe mitsamt Ladegerät,
- Uhr, Stoppuhr,
- Reinigungstücher, Reinigungsmittel,
- Kaliumchlorid (zur Sondenaufbewahrung). Kurzfristig lassen sich die Sonden in destilliertem Wasser oder Trinkwasser lagern,
- Watstiefel, Wathose.

Tab. 2: Notwendige Kalibrierungsintervalle für Sonden und Elektroden.

Sonden- oder Elektrodentyp	Kalibrierungs- und Kontrollintervalle
pH-Wert	tägliche Kalibrierung
Elektrische Leitfähigkeit	tägliche Kontrolle
Sauerstoff (CLARK-Elektrode) ¹	Kalibrierung vor jeder Einzelmessung
Sauerstoff (optische Messung)	selbstständige Kalibrierung
Redox-Spannung	Kontrolle erforderlich
Temperatur	Kontrolle erforderlich

¹ Die Clark-Elektrode sollte heutzutage nicht mehr eingesetzt werden, da sie gegenüber der optischen Sauerstoffmessung wegen Handhabung oder Kalibrierung eine größere Fehleranfälligkeit besitzt (WOLKERSDORFER 2008).

Da die Gesundheit der Probenehmer oberste Priorität hat, ist unbedingt auf persönliche Schutzausrüstung zu achten. Diese umfasst angemessene Kleidung, Helm und Schuhwerk, welche Schutz vor der Witterung und die persönliche Sicherheit bieten sollten. Sofern für die Probenahmen untertägige Befahrungen, z. B. in alten Stollen, erforderlich sind, sind Einzelheiten für diese Befahrungen insbesondere im Hinblick auf die Standsicherheit des Grubenbaus und im Hinblick auf das Vorhandensein atembarer Atmosphäre mit dem Bergwerkseigentümer vorher abzustimmen. Eine Person außerhalb des Stollens sollte die Befahrungen absichern. Diese Person muss sich während der ganzen Zeit in der Nähe des Stollens aufhalten und in der Lage sein, bei Eintritt unvorhersehbarer Ereignisse unverzüglich Hilfe herbeizuholen.

Bei der Probenahme sind Einweghandschuhe zu tragen. Diese schützen einerseits den Probenehmer vor potenziell toxischen Stoffen oder Mikroorganismen im Grubenwasser, andererseits die Grubenwasserprobe vor Kontamination durch den Probenehmer. Bei stark unterschiedlichen Wasserqualitäten zwischen den Probenahmen sollten die Handschuhe erneuert werden.

Es wird empfohlen, eine vollständige Checkliste für die Probenahme im Gelände zu führen, die auch noch so unbedeutend erscheinende Ausrüstungsgegenstände auflistet (Anhang 6.2). Des Weiteren ist die Prüfung von Funktion und Einsatzbereitschaft sämtlicher Geräte vor jeder Abfahrt erforderlich.

3.4.2 Besonderheiten bei der Probenahme in untertägigen Bergwerksanlagen

Ziel der Probenahme ist es, möglichst gering beeinflusste Grubenwasserproben für die spätere Analytik zu entnehmen. Dabei muss die Repräsentanz der Probe garantiert sein und eine Verunreinigung durch die Probenahme selbst ausgeschlossen werden. Die Probenahmemethode ist von der fachlichen Fragestellung sowie von der Probenahmestelle abhängig zu machen. WIEBER (2014) hat verschiedene Arten von Grubenwasser unterschieden, die auch unterschiedliche Probenahmetechniken erfordern. Es erfolgte eine Unterscheidung nach der Herkunft aus der gesättigten oder ungesättigten Zone (Abb. 6):

Gesättigte Zone:

- Grubenwässer in gefluteten Stollen (Tiefbausohlen) oder Schächten (1),
- in Blindschächten eingestaute Wässer (2),
- über Röschen gefasste und abfließende Wässer (meist mit einem Tagwasseranteil, 3).

Ungesättigte Zone:

- Sickerwässer aus Abbaubereichen (4),
- Wasserzutritte aus Schächten oder Rolllöcher der ungesättigten Zone (5),
- Sickerwasser außerhalb von Abbaubereichen (6).

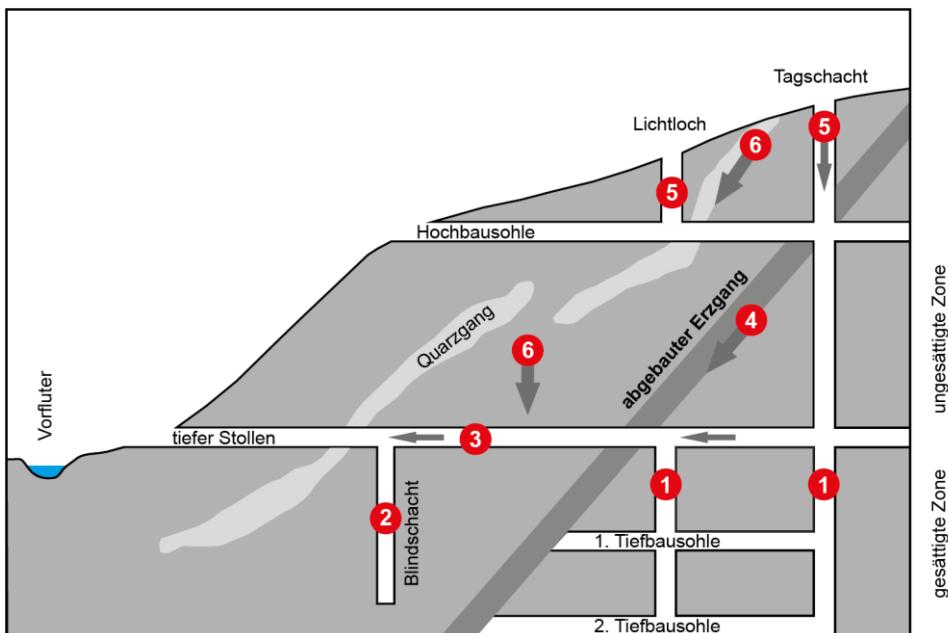


Abb. 6: Hydrogeologische Verhältnisse gefluteter Gangerzbergwerke (nach WIEBER 2014).

Die Vor-Ort-Untersuchungen, wie pH-Wert- oder Temperaturmessung, sind an den entnommenen Proben unverzüglich durchzuführen. Im Bereich des Steinkohlenbergbaus sind nur explosionsgeschützte Vor-Ort-Messgeräte zugelassen. Falls diese nicht vorhanden sind, können Temperaturmessungen mit herkömmlichen (Aquarium-) Thermometern durchgeführt und der pH-Wert mittels pH-Indikatoren bestimmt werden. Die pH-Messungen sollten allerdings nach dem Verlassen des Grubengebäudes mit pH-Messgeräten wiederholt werden, da die Farbumschläge bei schlechten Lichtverhältnissen nicht zuverlässig erkannt werden können. Die Säure- und Basentitrationen sind mittels Indikatoren unter Tage durchführbar.

Die Austrittsstellen der Sickerwässer in den Grubenbauen befinden sich in der ungesättigten Zone und im offenen System zur Atmosphäre. Häufig sind diese Sickerwasseraustritte infolge der Änderungen der Umgebungsbedingungen (z. B. Sauerstoffzutritt, Änderung von Luftdruck und -temperatur) mit Ausfällungen von Sekundärmineralen (z. B. Carbonate, Sulfate und Eisen-/Mangan(hydr)oxide) verbunden (Abb. 7). Eine Probenahme kann auch durch Auffangen des Sickerwassers mittels Folien oder an den Austrittsstellen durch geeignete Gefäße erfolgen. Hat sich das Wasser auf der Sohle eingestaut, kann eine Schöpfprobe entnommen werden.

Aus Bergwerksschächten in die Entwässerungsstollen auslaufende Wässer können mittels geeigneter Schöpfbecher entnommen werden. Eine einfache Probenahme aus größerer Teufe bietet das Schöpfplot. Es besteht aus einem Metall- oder Kunststoffrohr mit einer Verjüngung am unteren Ende, in dem sich ein Hartgummiball befindet. Beim Herablassen wird das Rohr mit Wasser durchströmt. Beim Hochziehen des Schöpflotes verschließt der Hartgummiball das Schöpfplot nach unten und ermöglicht somit eine angenähert teufengenaue Beprobung. Bei Teufen von mehreren Zehnernmetern funktionieren derartige Schöpfplots jedoch in der Regel nicht zuverlässig genug und sollten daher nicht eingesetzt werden. Da bei wissenschaftlichen Untersuchungen mitunter teufenabhängige Änderungen der hydrochemischen Beschaffenheit von Interesse sind, sollten Schöpfgeräte zum Einsatz kommen, die auf definierte Probenahmeteufen herabgelassen werden (COLDEWEY UND GÖBEL 2015). Bei dem Ruttner-Schöpfgerät werden die beiden Ventile am Kopf- und Fußteil durch ein Fallgewicht verschlossen und somit eine teufenabhängige Probe garantiert. Aufgrund der höheren Widerstandsfähigkeit (z. B. Korrosion, Druck) sollten Schöpfgeräte aus Edelstahl verwendet werden. Zu beachten ist weiterhin, dass einfache Schöpfgeräte nicht gasdicht sind und so eine Entgasung beim Heben stattfindet. Wenn der Austritt von Kohlensäure oder anderen Gasen aus den Grubenwässern zu erwarten ist, sollten deshalb spezielle, druckhaltende und gasdichte Schöpfgeräte eingesetzt werden.



Abb. 7: Ausfällungen von Carbonaten (1: Pfingstwiese, Bad Ems) und Eisenhydroxiden (2: Alvenslebenstollen, Westerwald).

3.4.3 Vor-Ort-Untersuchung

Parameter von Wasserproben, die sensitiv auf den Kontakt mit der Atmosphäre reagieren und sich daher schnell ändern, müssen vor Ort gemessen werden. Dazu gehören auch die organoleptisch zu bestimmenden Parameter wie Geruch, Farbe, Trübung und Gasbildung des Grubenwassers. Zu diesen Vor-Ort-Parametern gehören:

- **Wassertemperatur ϑ ,**
- **pH-Wert** (der durch Entgasung von Kohlensäure oder Lösung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid beeinflusst wird),
- **Sauerstoffsättigung und -massenkonzentration $\beta(O_2)$** (kann sich durch Lösen von atmosphärischem Sauerstoff ändern),
- **Redox-Spannung E_H** (oder auch ORP, *oxidation reduction potential*),
- **Kohlenstoffspezies** (messbar in der Regel durch die **Säurekapazität K_S und Basenkapazität K_B** , sofern das Grubenwasser keine erhöhten Eisenkonzentrationen aufweist),
- **Massenkonzentration an zweiwertigem Eisen $\beta(Fe^{2+})$ und Gesamteisen $\beta(Fe_{ges})$** (fotometrisch),
- **Massenkonzentration an reduzierten Schwefelverbindungen $\beta(S^{2-})$** (optisch oder fotometrisch).

Der pH-Wert ist als negativer dekadischer Logarithmus des Zahlenwertes der Hydronium-Aktivität ($pH = -\lg \{H_3O^+\}$), vereinfacht Wasserstoffionen-Aktivität ($pH = -\lg \{H^+\}$), definiert und beschreibt das Maß des sauren, alkalischen bzw. basischen oder neutralen Charakters einer wässrigen Lösung. Um den **Mittelwert mehrerer pH-Wert-Messungen** zu bestimmen, kann nicht das arithmetische Mittel der Messwerte herangezogen werden. Stattdessen müssen die gemessenen pH-Werte zunächst in die Wasserstoffionen-Aktivität umgerechnet werden, um daraus das arithmetische Mittel zu errechnen. Dieser Mittelwert ist dann wieder in den pH-Wert umzuwandeln.

Beispiel

Es werden die pH-Werte von drei Wasserproben bestimmt ($\text{pH}_{\text{Probe1}} = 7,1$; $\text{pH}_{\text{Probe2}} = 8,2$; $\text{pH}_{\text{Probe3}} = 9,3$). Danach werden die Messwerte in die entsprechenden Wasserstoffionen-Aktivitäten ($\{\text{H}^+\}$) umgerechnet ($\{\text{H}^+\}_{\text{Probe1}} = 10^{-7,1}$; $\{\text{H}^+\}_{\text{Probe2}} = 10^{-8,2}$; $\{\text{H}^+\}_{\text{Probe3}} = 10^{-9,3}$). Schließlich wird daraus das arithmetische Mittel bestimmt $\{\text{H}^+\} = 2,87 \cdot 10^{-8}$, das im letzten Schritt in den pH-Wert konvertiert wird ($\text{pH}_{\text{Mittelwert}} = -\log 2,87 \cdot 10^{-8} = 7,54$; Tab. 3). Ein Onlinerechner mit grafischer Darstellung der Ergebnisse findet sich auf der Webseite www.wolkersdorfer.info/ph.

Tab. 3: Mittelwertberechnung des pH-Wertes mittels der Wasserstoffionen-Aktivitäten.

	pH (gemessen) entspricht [-]	Wasserstoffionen- Aktivität $\{\text{H}^+\}$ (berechnet) [mol/L]
Probe 1	7,1	$10^{-7,1}$
Probe 2	8,2	$10^{-8,2}$
Probe 3	9,3	$10^{-9,3}$
Arithmetisches Mittel	8,2	$2,87 \cdot 10^{-8}$
Mittelwert nach Wasserstoffionen-Aktivität	7,54	konvertiert

Die **Redox-Spannung** (früher Redox-Potenzial) ist eine wichtige Bezugsgröße zur Beurteilung, ob in einer wässrigen Lösung bzw. in einem System reduzierende oder oxidierende Verhältnisse vorliegen. Sie ist die Summe des Reduktionspotenzials (Produkt der in der Lösung befindlichen Ionenspezies mit reduzierenden Eigenschaften) und Oxidationspotenzials (Produkt der in der Lösung befindlichen Ionenspezies mit oxidierenden Eigenschaften) der Lösung. Gemäß der NERNST-Gleichung ist sie von den jeweiligen Konzentrationen bzw. Aktivitäten der verschiedenen Ionenspezies abhängig und wird auch durch den pH-Wert der Lösung sowie der Temperatur beeinflusst. Je höher die Redox-Spannung ist, desto stärker ist die Oxidationskraft im System. Je negativer die gemessene Spannung ist, desto höher ist das Reduktionspotenzial im System. In Verbindung mit POURBAIX-Diagrammen lässt sich anhand der gemessenen Redox-Spannung und des pH-Wertes beurteilen, in welchem thermodynamischen Stabilitätsbereich sich eine Spezies befindet.

Bei der Messung im Gelände (COLDEWEY UND GÖBEL 2015) sind insbesondere folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Da die gemessene Redox-Spannung immer eine Potenzialdifferenz zwischen der zu untersuchenden Lösung und der eingesetzten Elektrode ist, muss zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse die gemessene Spannung auf den Standard umgerechnet werden. Dieser ist durch die Standard-Wasserstoffelektrode unter Standardbedingungen (1 bar bei 25 °C) definiert. Damit dies im Nachhinein bei der Auswertung der Ergebnisse geschehen kann, muss protokolliert werden, welche Elektrode zur Messung eingesetzt wurde. Ebenso sind für eine spätere Umrechnung auf die Standard-Wasserstoffelektrode zwingenderweise die Temperatur und der pH-Wert zu bestimmen und entsprechend zu protokollieren.
- Gemäß der DIN 38404-6 muss die Messung so lange durchgeführt werden, bis die gemessene Spannung über einen Zeitraum von 5 Minuten im Bereich ± 1 mV konstant ist. Dies kann bis zu 30 Minuten dauern.
- Eine Angabe von Nachkommastellen ist bei der Redox-Spannung obsolet, da dies eine nicht vorhandene Genauigkeit impliziert. Die Genauigkeit einer solchen Messung beträgt in der Regel ± 10 mV (WOLKERSDORFER 2021).
- Die Zufuhr von atmosphärischem Sauerstoff wirkt sich auf die gemessene Redox-Spannung aus. Daher kann die Bestimmung nicht im Labor erfolgen, sondern muss vor Ort im Gelände durchgeführt werden.
- Es ist nicht möglich, die Redox-Spannung mit einer pH-Elektrode zu messen, indem man von pH nach mV umschaltet. Wenn zwischen dem gemessenen pH-Wert und der Redox-Spannung eine statistisch signifikante lineare Korrelation besteht, wurde die Redox-Spannung versehentlich mit einer pH-Elektrode gemessen.
- Ein Onlinerechner zur Berechnung der auf die Standard-Wasserstoffelektrode kompensierten Redox-Spannung findet sich hier: www.wolkersdorfer.info/redox.

Säure- und Basenkapazität sind zwei wichtige Parameter, um die Beschaffenheit eines Wassers zu charakterisieren, und um zu beurteilen, ob ein Wasser netto alkalisch oder netto acidisch ist. Im Gegensatz zum pH-Wert, der über die Aktivität der Protonen ($\{H^+\}$) definiert ist, finden bei diesen Parametern alle sauer und basisch reagierenden Inhaltsstoffe Berücksichtigung. Der Begriff Säurekapazität gibt an, ob ein Wasser Säure neutralisieren bzw. puffern kann. Der Begriff Basenkapazität gibt hingegen an, ob ein Wasser Basen neutralisieren bzw. puffern kann. pH-Werte können nicht als Indiz für netto acidisches oder basisches Wasser dienen, sondern nur die Säure- und Basenkapazität. Aus der Differenz dieser beiden Werten lässt sich ableiten, ob ein Wasser netto alkalisch oder netto acidisch ist:

- Netto acidisch: Basenkapazität – Säurekapazität > 0
(also Basenkapazität $>$ Säurekapazität)
- Netto alkalisch: Basenkapazität – Säurekapazität < 0
(also Basenkapazität $<$ Säurekapazität)

In der Praxis von Bedeutung sind diese Werte beispielsweise bei der Planung einer Grubenwasseraufbereitung (WOLKERSDORFER 2021). Ohne diese Parameter kann nicht entschieden werden, welche Systeme und Technologien zuverlässig eingesetzt werden können.

Säure- und Basenkapazität werden anhand einer Titration mittels Glasbürette oder mithilfe eines Titrationsgerätes mit einer Säure bzw. Base mit definierten Konzentrationen bestimmt. Für eine exakte Bestimmung sollte der pH-Wert bei der Titration nicht mithilfe eines Indikators, sondern mit einem pH-Meter festgestellt werden. Bei der Messung ist eine ständige Durchmischung des Wassers mit der Säure oder Base zu gewährleisten. Das zum Erreichen eines definierten pH-Wertes verbrauchte Volumen an Säure bzw. Base ergibt die Säure- bzw. Basenkapazität:

Die **Säurekapazität K_S** (oder auch Alkalinität) eines Wassers wird durch dessen Verbrauch an Säure (in der Praxis HCl) bis zum Erreichen von pH = 4,3 oder pH = 8,2 ermittelt (Abb. 8). Haben die Wässer pH-Werte zwischen pH = 4,3 und pH = 8,2, so kann der $K_{S4,3}$ bei wenig mineralisiertem Wasser mit der Stoffmengenkonzentration an Hydrogencarbonat $c(\text{HCO}_3^-)$ gleichgesetzt werden:

$$c(\text{HCO}_3^-) \triangleq K_{S4,3} \text{ oder } S8,2 = \frac{V_T \cdot c_E}{V_{\text{Probe}}} \text{ mmol/L} \quad (1)$$

mit c Stoffmengenkonzentration, mmol/L
 V_T Volumen an Säure (HCl; bis pH = 8,2 oder 4,3 titriert), mL
 c_E Stoffmengenkonzentration (HCl), mmol/L
 V_{probe} Probenvolumen (zumeist 50 mL oder 100 mL), mL

Die **Basenkapazität K_B** (oder auch Acidität) eines Wassers wird durch dessen Verbrauch an Base (in der Praxis NaOH) bis zum Erreichen von pH = 8,2 oder pH = 4,3 ermittelt. Haben die Wässer pH-Werte zwischen pH = 4,3 und pH = 8,2, so kann der $K_{B8,2}$ bei wenig mineralisiertem Wasser mit der Stoffmengenkonzentration an gelöster Kohlensäure (H_2CO_3) gleichgesetzt werden, liegt der pH-Wert unterhalb von pH = 4,3, so ist auch die Stoffmengenkonzentration an Hydroniumionen (H_3O^+) nicht vernachlässigbar. Liegen reduzierte Wässer vor, so erfasst die Basenkapazität K_B auch die Metallacidität (z. B. Fe, Al, Mn):

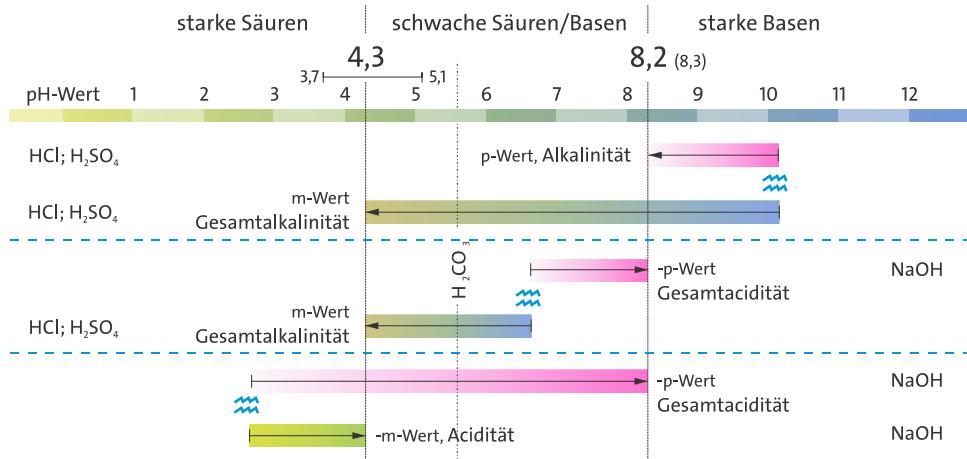
$$c(\text{CO}_2, \text{H}_3\text{O}^+, \text{Fe}^{2/3+}) \triangleq K_{B8,2} \text{ oder } 4,3 = \frac{V_T \cdot c_E}{V_{\text{Probe}}} \text{ mmol/L} \quad (2)$$

mit c Stoffmengenkonzentration, mmol/L
 V_T Volumen NaOH (bis pH = 8,2 oder pH = 4,3 titriert), mL
 c_E Stoffmengenkonzentration (NaOH), mmol/L
 V_{probe} Probenvolumen (zumeist 50 mL oder 100 mL), mL

Die Basenkapazität K_B eisenhaltiger Wasserproben ist um den Basenverbrauch zur Neutralisation der Fe^{2+} -Oxidation/Eisenhydroxidfällung zu korrigieren (Tab. 4), was

jedoch nicht bei höheren Eisenkonzentrationen im Grubenwasser funktioniert. Alternativ lässt sich die Basenkapazität auch näherungsweise aus der Wasseranalyse errechnen (WOLKERSDORFER 2021, WOLKERSDORFER 2008, HEDIN et al. 1994).

Ausführliche Diskussionen der Säure- und Basenkapazität von Grubenwasser finden sich in KIRBY UND CRAVOTTA (2005a, b) sowie WOLKERSDORFER (2021). In der Abb. 8 sind drei charakteristische Beispiele für die Bestimmung der Gesamtazidität und Gesamtalkalinität von Grubenwässern dargestellt. Der Umkehrpunkt im sauren Bereich kann sich je nach Mineralisation zwischen 3,7 und 5,1 bewegen, wohingegen der im basischen Bereich je nach Vorschrift entweder 8,2 oder 8,3 beträgt. Die Angabe der Konzentration soll in mmol L^{-1} und nicht wie oftmals in $\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$ erfolgen. Nur noch historisch relevant sind der p- und der m-Wert, deren Bezeichnungen vom Umkehrpunkt des Phenolphthaleins und Methylrots abgeleitet ist (WOLKERSDORFER 2021).



$K_{8,2}$ Säurekapazität 8,2 (Phenolphthalein): Alkalinität (starke Basen), p-Wert

$K_{4,3}$ Säurekapazität 4,3 (Methylrot-Bromkresolgrün): Gesamtalkalinität (schwache/starke Basen), -p-Wert

$K_{8,2}$ Basenkapazität 8,2 (Phenolphthalein): Gesamtacidität (schwache/starke Säuren), m-Wert

$K_{8,3}$ Basenkapazität 4,3 (Bromphenolblau): Acidität (starke Säuren), -m-Wert

$$1 \text{ [mmol L}^{-1}\text{]} = 1 \text{ [meq L}^{-1}\text{]} = 50,04 \text{ [mg L}^{-1} \text{CaCO}_3\text{]}$$

Abb. 8: Begriffe und pH-Werte, die im Zusammenhang mit Säure- und Basenkapazität (K_s , K_B) bei Grubenwässern international und national üblicherweise verwendet werden.

Tab. 4: Korrektur der Acidität einer Eisen(II)-haltigen Wasserprobe (LEGLER et al. 1996).

pH-Wert	Stoffmengenkonzentration $c(\text{Fe(III)})$, mmol/L	Massenkonzentration $m(\text{Fe(III)})$, mg/L	Korrektur	
			mmol CO ₂ / mmol Fe(II)	mg CO ₂ / mg Fe(II)
6,5–7,0	< 0,2	< 11	-1,00	-0,80
	< 0,2	< 11	-1,25	-1,00
< 6,5	< 0,4	< 22	-1,25	-1,00
	> 0,4	> 22	-2,00	-1,58

Weiterhin sollte vor Ort das Vorhandensein **von zweiwertigem Eisen (Eisen(II))** durch Teststäbchen geprüft werden. Zeigt das Teststäbchen Fe²⁺ an, ist vor Ort eine Teilprobe des Wassers für die fotometrische Analytik im Labor in 100 mL Braunglasflaschen abzufüllen, in denen 10 mL 1,10-Phenanthrolin vorzulegen ist. Die Analytik im Labor sollte innerhalb von 48 Stunden nach der Probenahme erfolgen (LEGLER et al. 1986). Besser jedoch ist es, Fe²⁺ und Gesamteisen vor Ort mit einem mobilen Fotometer (Kolorimeter) zu messen oder alternativ die Eisenspeziierung mit HCl in der Probe zu stabilisieren. Indiziert eine Grubenwasserprobe durch einen fauligen Geruch das Vorhandensein von **Schwefelverbindungen**, sollte ebenso vor Ort eine Teilprobe in eine 100 mL Probenflasche abgefüllt werden, in der 20 mL 0,1 M Zinkacetat-Lösung vorgelegt sind. Hierdurch werden Sulfide und Schwefelwasserstoff als Zinksulfid gefällt. Im Labor erfolgt die fotometrische Analytik nach Unterschichtung von 4 mL Dimethyl-p-phenylen diamin (LEGLER et al. 1986). Alternativ kann die Sulfid-Konzentration vor Ort kolorimetrisch mit der Methylen-Blau-Methode erfolgen. Die Tabelle 5 fasst Probenvolumina und -stabilisierung für Parameter zusammen, die bei der Beprobung von Grubenwässern vor Ort zu analysieren bzw. zu stabilisieren sind. Für die Dokumentation der Vor-Ort-Parameter sind im Feldbuch entsprechend des Feldprotokoll-Vordrucks (Tab. 5) alle Parameter zu erfassen.

Tab. 5: Probenvolumina und -gefäß für die Analytik typischer Vor-Ort-Parameter von bergbaugeprägten Wässern.

Parame- ter	Analyse- gerät	Probenvolumen mL	Probengefäß	Probenpräparation
HCO ₃ ; CO ₂	Bürette oder Titrator	50 – 100	Schliffstopfen, Glasflasche	Vor-Ort-Titration oder Probe gasblasenfrei abfüllen und sofort im Labor titrieren, bei höher mineralisiertem Grubenwasser nur mittels TIC ermittelbar
Eisen(II)	Fotometer	50 – 100	100 mL Braunglas- flasche	Vorlage von 10 mL 1,10-Phenanthrolin
Eisen(II)	Kolorimeter	25	Glasküvette	keine, wenn vor Ort analysiert wird
Eisen gesamt	Kolorimeter	10	Glasküvette	keine, wenn vor Ort analysiert wird
Sulfid	Fotometer	80	100 mL Maßkolben	Vorlage von 20 mL 0,1 M Zinkacetat-Lösung, Unterschichtung von 4 mL Dimethyl-p- phenylen diamin
Sulfid	Kolorimeter	0,25 – 25	Glasküvette	keine, wenn vor Ort analysiert wird

3.4.4 Probenvolumina und Probenpräparation für die instrumentelle Analytik

Zur Beurteilung eines Grubenwassers sind in Abhängigkeit vom Untersuchungsziel zahlreiche Wasserparameter analytisch zu ermitteln (Anhang 6.1). Die Stoffmengenkonzentrationen c der Hauptanionen (HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) und Hauptkationen (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ und ggf. Fe²⁺, Fe³⁺) werden z. B. für die Berechnung von Ionenbilanzen und damit für die Überprüfung einer korrekten Analytik benötigt. Anionen werden in der Regel mithilfe eines Ionenchromatographen (IC) oder eines Diskretanalysators analysiert, Kationen mit einem Atomadsorptionsspektrometer (AAS), einem induktiv gekoppelten optischen Emissionsspektrometer (ICP-OES) oder einem induktiv gekoppelten Massenspektrometer (ICP-MS). Letztere sind auch geeignet, die Konzentrationen von Spurenelementen und Arsen in einer Wasserprobe zu bestimmen. Ist die Konzentration an organischem Kohlenstoff von Interesse, kann dieser durch Elementaranalysatoren oder TOC-Analysator bestimmt werden. Probenvolumina und Probenpräparation für typische Grubenwasserinhaltstoffe, die im Labor mithilfe der instrumentellen Analytik bestimmt werden, sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Probenvolumina und -gefäß für die instrumentelle Analytik.

Parameter	Analysegerät	Probenvolumen, mL ^a	Probengefäß	Probenpräparation
Kationen (Metalle, Metalloide)	AAS, ICP-OES, ICP-MS	15 – 50	PP-Röhrchen, ggf. vorgespült mit 5%iger HNO ₃	„gelöste“ Elemente: Filtration mittels 0,45 µm oder 0,2 µm Membranfilter
				Elemente gesamt: Mikrowellenaufschluss
				säurelöslich: keine Vorbereitung
				Ansäuern aller Varianten mit 1% HNO ₃ , ultrapur
Anionen	IC oder Diskretanalsator	15 – 1.000	PP-Röhrchen oder Flaschen	Kühlung unter 6 °C, zeitnahe Analytik
TOC (total organic carbon [organischer Gesamt- kohlenstoff])	EA oder TOC- Analyzer	20 – 1.000	PP-Flasche oder Braunglasflasche mit Aluminiumfolie verschlossen	Keine Filtration, Ansäuern auf pH < 2 mit 1 % HCl, ultrapur
TIC (total inorganic carbon [anorganischer Gesamtkohlenstoff])	EA oder TOC- Analyzer	500 – 1.000	PP-Flasche oder Braunglasflasche mit Aluminiumfolie verschlossen	Keine Filtration

^a Menge stets mit dem Labor abklären; Spannbreite ergibt sich aus den unterschiedlichen Analysenmethoden für den jeweiligen Parameter

Abkürzungen: AAS: Atomabsorptionsspektrometrie; IC: Ionenchromatographie; ICP-MS: inductively coupled plasma mass spectrometry (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma); ICP-OES: inductively coupled plasma optical emission spectrometry (optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas); EA: elemental analyzer (Elementaranalyse); PP: Polypropylen

3.4.5 Analytik weiterer Parameter

Die Analytik der oben beschriebenen klassischen Wasserbeschaffenheitsparameter muss bei Verdacht auf bergbaubürtige Polychlorierte Biphenyle (PCB) oder Polazyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) durch deren analytische Überwachung ergänzt werden (für die Analyse von PCB und PAK liegen zahlreiche DIN-Normen vor, die unter www.beuth.de/de/regelwerke recherchierbar sind). Gemäß DIN 38414-20 sind für die PCB-Probenahme 0,5 – 1 L und gemäß 38414-20 für PAK 1 L Weithals-Standflaschen aus braunem Glas mit Stopfen zu verwenden.

Soll die **mittlere Aufenthaltszeit des Grubenwassers** bestimmt werden, können Proben zur Analytik der radioaktiven Isotope ${}^3\text{H}$ (Tritium), ${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ (Tritium/Helium) bzw. ${}^{14}\text{C}$ (Kohlenstoff) aus dem Grubenwasser entnommen werden. Dabei liefert die klassische ${}^3\text{H}$ -Analytik (nach Anreicherung mittels Elektrolyse und Flüssigszintillationsspektrometrie, ca. 1 L Probenvolumen erforderlich) Aussagen zur mittleren Aufenthaltszeit des Grubenwassers von bis zu 60 Jahren. Die kombinierte Analytik von ${}^3\text{H}$ und seinem Zerfallsprodukt ${}^3\text{He}$ (über Edelgasmassenspektrometrie, ca. 40 mL Probenvolumen in speziellen Kupferrohren erforderlich, siehe www.noblegas.uni-bremen.de/methoden) erbringt, mit deutlich besserer zeitlicher Auflösung, Aussagen bis zu einer mittleren Aufenthaltszeit von 40 Jahren. Altwasseranteile (> 300 Jahre) können mit der Radiocarbonmethode (oder ${}^{14}\text{C}$ -Datierung) ebenfalls mittels Flüssigszintillationsspektrometrie quantifiziert werden.

Aussagen zur Zusammensetzung des Wassers (d. h. des Anteils von Niederschlags- bzw. Oberflächenwassers im Grubenwasser) können durch Analytik der stabilen Isotopenverhältnisse des Grubenwassers ($\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$) getroffen werden. Diese Analytik kann mittels Stabilisotopenmassenspektrometrie oder Laserspektrometrie bereits an sehr kleinen Probenvolumina (2 mL) erfolgen.

3.5 Empfehlungen zur Dokumentation

Bei der Geländearbeit ist es von essenzieller Bedeutung, alle Beobachtungen gemäß der Vorlage (Anhang 6.4) in einem Feld- oder Geländebuch zu notieren. Dies betrifft in erster Linie die Messwerte, die alle mit der jeweiligen Einheit zu notieren sind, aber auch andere Beobachtungen, die zunächst einmal belanglos erscheinen können (z. B. Fremdkörper in Probenahmestelle, Umläufigkeit). Ein Feldbuch ist ein gebundenes Buch mit möglichst wasserfesten, nummerierten Blättern, aus dem keine Seiten entnommen oder herausgerissen werden dürfen. Es ist langfristig und sicher zu lagern und sollte – wenn möglich – elektronisch verfügbar sein. Um auch bei Regen schreiben zu können und um Verwischen beim Kontakt mit Wasser zu vermeiden, sollte mit einem mittelharten Bleistift geschrieben werden (dies genügt nicht den QA/QC Kriterien an ein Laborbuch), sofern kein wetterfester Kugelschreiber zur Hand ist (z. B. „Rite in the Rain“, Fa. J.L. Darling LLC, oder Faber Castell). Es dürfen keine Werte radiert oder unkenntlich gemacht werden, und leere Seiten oder leerer Raum sind mit einem Strich durch den freien Platz unbrauchbar zu machen. Fehlerhafte Niederschriften sind einmal durchzustreichen, sodass sie noch zu lesen sind und dürfen nicht „ausgebessert“ bzw. überschrieben werden. Zur Aufzeichnung gehören wenigstens das Datum, die Uhrzeit der Messung, die Namen aller Beteiligten am Geländetag sowie die Bezeichnungen der Messstelle und der Proben. Beobachtungen zum Wetter haben sich in vielen Fällen als vorteilhaft erwiesen.

Bei allen Messeinsätzen sollten ein Datenblatt des Probenahmenortes zur Grundausstattung gehören (Abb. 9). Seit 2016 sind derartige Datenblätter für die

wichtigsten sächsischen Stollenmundlöcher bzw. Grubenwasseraustritte über die Website des LfULG (www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/Steckbrief_Stolln.pdf; Beispiel in Abb. 9) verfügbar.

Bundesland	SACHSEN					
Bergrevier	Siebenlehrner Revier					
Tiefer Wolf Stolln						
Bergbauweig	Erzbergbau					
Messstellenkennzahl	OBF31714					
Name Einzugsgebiet	Freiberger Mulde-4					
Einzugsgebiet ID	DESN_542-4					
Ostwerte	381.856,00					UTM, Zone 33N
Nordwerte	5.655.282,00					
Schüttungsdaten	Einheit	Anzahl Messwerte	langjähriger Mittelwert	Minimum Wert	Minimum Datum	Maximum Wert
SOBA (2010-2011)	l/s	keine Angaben	10			
Beschaffenheitsdaten (2005-2019)^[1]						
	Einheit		langjähriger Mittelwert	Minimum Wert	Minimum Datum	Maximum Wert
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/L	15	0,49	0,38	15.04.13	0,58
Chlorid (Stoffmengenkonzentration gelöst)	mg/L	15	79,2	72	25.02.09	88
Elektrische Leitfähigkeit (bei 25°C)	µS/cm	15	960	931	02.12.13	993
pH-Wert (Feld)	[·]	15	7,24	7,1	16.09.11:15	7,4
Sauerstoffkonzentration	mg/L	15	7,65	6,6	28.10.09	8,6
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	15	4,25	4	12.08.13	4,5
Sulfat (Stoffmengenkonzentration gelöst)	mg/L	15	146	130	28.08.17	160
Wassertemperatur	°C	15	10,4	9,7	18.02.13	11,3
Arsen (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	157	130	27.05.19	190
Arsen (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		49,6	41	27.05.19	59,9
Eisen (Stoffmengenkonzentration gelöst)	mg/L	15	<0,03	<0,03	24.07.19	<0,03
Eisen (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		0,005	0,005	24.07.19	0,005
Blei (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	<0,2	<0,2	24.07.19	<0,2
Blei (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		0,03	0,03	24.07.19	0,03
Cadmium (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	0,11	0,07	28.03.17	0,2
Cadmium (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		0,03	0,02	28.03.17	0,06
Kupfer (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	1,14	<2	25.02.09	3,1
Kupfer (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		0,36	0,03	25.02.09	0,98
Nickel (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	5,18	4,1	15.04.13	6
Nickel (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		1,6	1,29	15.04.13	1,89
Zink (Stoffmengenkonzentration gelöst)	µg/L	15	18,1	13	15.04.13	26
Zink (Gesamtstofftransport^[2])	kg/a		5,72	4,10	15.04.13	8,20
Gewässerabschnitt vor dem Stollen Mundloch	Freiberger Mulde-4					
Name Messstelle	uh. Siebenlehn					
Messstellenkennzahl	OBF31710					
Oberwasserkörper ID	DESN_542-4					
Flusskilometer						
Ostwerte	382.018					
Nordwerte	5.655.200					
Gewässerabschnitt nach dem Stollen Mundloch	Freiberger Mulde-4					
Name Messstelle	Nossen - Altzella					
Messstellenkennzahl	OBF31800					
Oberwasserkörper ID	DESN_542-4					
Flusskilometer						
Ostwerte	379.143					
Nordwerte	5.658.319					

[1] LfULG, 2018. interdisziplinäre Daten und Auswertungen. Von Datenportal iDA: <https://www.umwelt.sachsen.de, 2018>

[2] Gesamtstofftransport = gelöste Konzentration × Schüttung (langjähriger Mittelwert)

Abb. 9: Muster für ein Datenblatt.

Bei elektronischer Speicherung sind erklärende Metadaten beizufügen. Hierbei ist auf die Halbwertszeit der elektronischen Medien zu achten. Für eine langfristige Datenhaltung kann mit den deutschen Datenzentren kooperiert oder bei Publikationen die Rohdaten auf einen Publikationsserver gestellt werden.

3.6 Probenbezeichnung

Jede Probe sollte wenigstens mit den folgenden Angaben versehen sein: Projekt, Ort der Probenahme, Probenahmestelle, Datum, Bearbeiter (WOLKERSDORFER 2021). Barcodes oder Sender-Empfänger-Systeme (z. B. RFID) können diese Angaben nur ergänzen, aber nicht ersetzen. Nur wenn gewährleistet ist, dass es eine lückenlose Dokumentation gibt, die auch für eine elektronische Dokumentation geeignet ist, kann auf weitere Angaben verzichtet werden.

Erfahrungsgemäß kann es zur Verwechslung von Proben kommen. Wenn aber die im Gelände und im Labor gemessene elektrische Leitfähigkeit einer nicht angesäuerten Probe übereinstimmen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um dieselbe Wasserprobe handelt, da unterschiedliche Wasserproben selten die gleiche elektrische Leitfähigkeit haben.

Probenbezeichnungen, die fast ausschließlich aus Ziffern bestehen, sind fehleranfälliger bei der Handhabung als solche mit Zahlen-Buchstaben-Kombinationen. Probenbezeichnungen von A1.2 – A2.9 durchgehend bis H1.0 – H2.9 sind ungeeignet und fehleranfällig bei der Laborarbeitung. Auch auf Bezeichnungen wie P1, P2 und so fort sollte verzichtet werden, um Verwechslungen mit anderen, identisch bezeichneten Proben zu vermeiden. Grundsätzlich sind die Bezeichnungen des Probenahmeortes und der Probenahmestelle beizubehalten.

Als überaus nützlich hat sich die folgende Vorgehensweise bei der Benennung von Proben erwiesen: Projektkürzel-Kurzdatum-Probenahmestelle. Dies ergibt dann, beispielsweise, eine Probenbezeichnung wie RZS-1208-RSS (Reiche Zeche Schacht – 12. August – Roths Schönberger-Stollen-Sohle). Das Datum kann um das Jahr erweitert werden, um doppelte Bezeichnungen zu vermeiden. Weiterhin sollten die letzten drei Buchstaben auf der Unterseite der Probenahmeflasche wiederholt werden. Selbst wenn sich die Beschriftung (Aufkleber oder Permanentstift) teilweise lösen sollte, wird durch die vollständigen, oben genannten Angaben und die doppelte Beschriftung eine Probe stets eineindeutig zuordenbar bleiben. Wenn zentral für ein Projekt bereits eine Vorschrift für die Benennung von Proben existiert, ist diese selbstverständlich der hier vorgeschlagenen vorzuziehen. Viele Projekte ziehen sich über Jahre, wenn nicht Jahrzehnte hin, und dann ist es unerlässlich, die Messstellen in einer Stammakte exakt zu beschreiben. Dort sind die Probenahmen laufend zu dokumentieren, bauliche Veränderungen zu erfassen oder die Verlegung von Messstellen darzulegen. Außerdem ist ein Verfahren zu entwickeln, wie

Doppel- oder Blindproben zu entnehmen sind und wie diese bezeichnet werden sollten, damit das Labor nicht durch Raten erkennt, um welche Art von Proben es sich handeln könnte.

3.7 Abflussmessungen

Für die Ermittlung von Stofffrachten möglicher Schad- und Problemstoffe sollte zusätzlich zur Massenkonzentration β zur gleichen Zeit und an der gleichen Probenahmestelle/Messstelle (dem Stollenmundloch oder wie in Abschnitt 3.2 empfohlen einer Stelle kurz vor der Mündung des Grubenwassers in den Vorfluter) auch die Abflussrate (bzw. Durchflussrate oder der Volumenstrom \dot{V}) erfasst werden. Dann errechnet sich der Stofftransport (Massenstrom) \dot{m} wie folgt (DIN 4049-2):

$$\dot{m} = \dot{V} \times \beta \quad (3)$$

mit \dot{m} Stofftransport (Massenstrom), g/s

\dot{V} Abflussrate, Durchflussrate, Volumenstrom, L/s

β Massenkonzentration, g/L

Umfassende Informationen zu einer Vielzahl von Abflussmessverfahren finden sich in MORGENSCHWEIS (2018), COLDEWEY UND GÖBEL (2015) sowie in LAWA (1984, 1991) und mit vielen Durchführungshinweisen für Grubenwasser in WOLKERSDORFER (2008). Für eine einmalige Untersuchung oder eine erste Bestandsaufnahme werden in der Regel **mobile Messgeräte für temporäre Messungen** eingesetzt. Die einfachste und gleichzeitig exakte Methode ist dabei die volumetrische Erfassung der Abflussrate **mittels Behälter und Stoppuhr**. Dieser kann je nach Art des Wasseraustrittes ein Eimer, eine Wanne oder ein Sack in verschiedenen Größen sein. Sie ist jedoch nur bei geringen Volumenströmen bis 500 L/min und einem gut fassbaren Abfluss anwendbar. Ein in der Hydrologie häufig eingesetztes mobiles Messgerät ist der **hydrometrische Messflügel**. Aus der Umdrehung eines Schaufelrades kann die Geschwindigkeit des fließenden Wassers bestimmt werden. Hierzu wird das Gewässer in vertikale Abschnitte unterteilt, in denen die Fließgeschwindigkeiten bestimmt werden. An der Messstelle sollten laminare Strömung, eine gleichmäßige Gewässersohle und Wasserstände über 5 cm vorliegen. Durch den Einsatz unterschiedlicher Schaufelräder können geringe bis große Durchflüsse erfasst werden. Zur genauen Bestimmung der Geschwindigkeit werden die verschiedenen Schaufelräder durch den Hersteller kalibriert. Es empfiehlt sich nach längerem Geländeinsatz das Messgerät dem Hersteller zur Kalibrierung zuzusenden. Tabelle 7 fasst in der Hydrometrie häufig verwendete Abflussmessverfahren und ihre Anwendungsbereiche zusammen.

Wird an der Messstelle keine ebene Gewässersohle, ein zu niedriger Wasserstand oder turbulente Strömung vorgefunden, kann die Abflussrate durch einen Markierungs- oder Tracerversuch (z. B. durch eine Zugabe von Natriumchlorid als Markierungsmittel,

Salzverdünnungsmethode, Abb. 10, Abb. 11) bestimmt werden. Für die am häufigsten angewendete Salzverdünnungsmethode mit Impulsinjektion ist eine der Durchflussrate angepasste Salzmasse sowie ein kontinuierlich aufzeichnendes Leitfähigkeitsmessgerät notwendig, das mit der Salzkonzentration des zu messenden Gewässers zu kalibrieren ist (MOORE 2005; Abb. 10).

Alternativ kann auch ein Handmessgerät zum Messen der elektrischen Leitfähigkeit verwendet werden. Spätestens zum Zeitpunkt der Impulszugabe des Markierungsmittels ist die Aufzeichnung der Salzkonzentration oder der elektrischen Leitfähigkeit zu starten, wobei die Messstelle um das 20- bis 50-fache der Gewässerbreite abstromig der Zugabestelle sein muss. Die Messergebnisse der Salzkonzentration zu den verschiedenen Messzeiten können in einer Kurve dargestellt werden, aus der sich der Durchbruch des Salzeintrages ableSEN lässt (Abb. 11). Um die Durchflussrate mittels eines Markierungsversuches zu bestimmen, wird der Quotient aus der zugegebenen Masse des Markierungsmittels und dem Integral der Durchbruchskurve ermittelt. Dieser Quotient aus Volumen pro Zeiteinheit entspricht der Durchflussrate im gewählten Gewässerabschnitt. Details zur Methode finden sich in LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2002), KÄSS (2004), COLDEWEY UND GÖBEL (2015) und WOLKERSDORFER (2008).

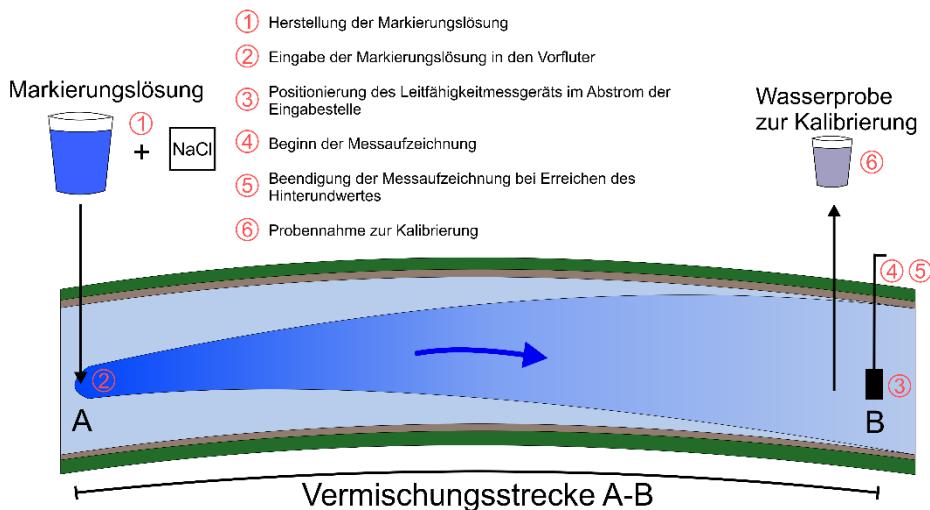


Abb. 10: Prinzipskizze zur Durchführung einer Salzverdünnungsmethode (verändert nach MUGOVA UND WOLKERSDORFER 2022).

Beispiel

Zur Bestimmung der Abflussrate eines Vorfluters wurde Natriumchlorid (NaCl) mit einer Masse m_{NaCl} von 1.017,8 g hinzugegeben. Das Integral der Durchbruchskurve ergibt einen Wert von 64,9 g · s/L. Hieraus errechnet sich die Abflussrate wie folgt:

$$\dot{V} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{\int_0^{\infty} \beta \cdot \Delta t} = \frac{1.017,8 \text{ g}}{64,9 \frac{\text{g} \cdot \text{s}}{\text{L}}} = 15,7 \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (3)$$

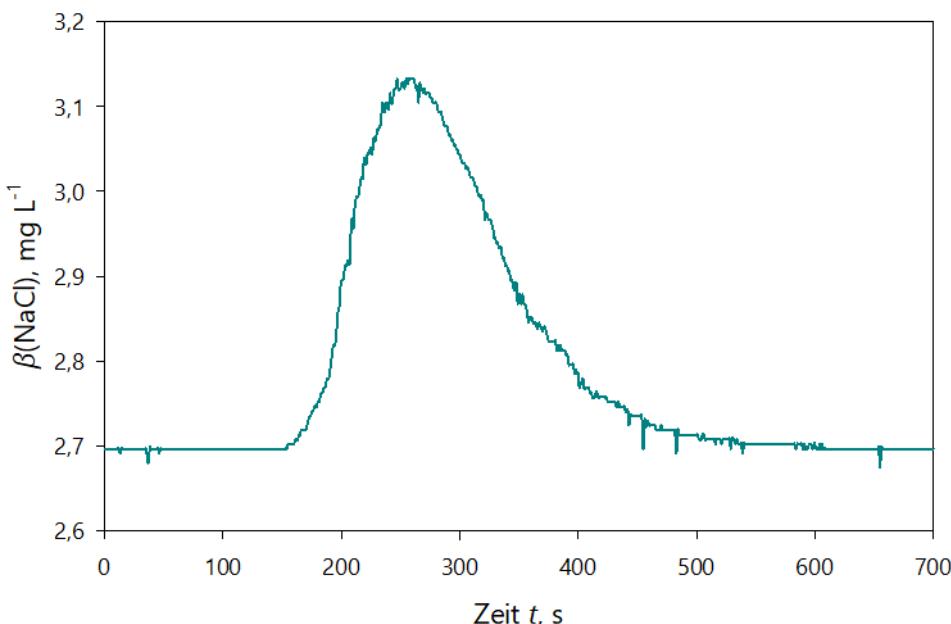


Abb. 11: Ergebnis einer Messung der Abflussrate mit der Salzverdünnungsmethode (Gernrode/Harz, WOLKERSDORFER 2008).

Für eine **kontinuierliche, längerfristige Überwachung der Abflussrate** an einem Stollen bzw. im Vorfluter, in den das Grubenwasser aus dem Stollen abfließt, können fest installierte Messsysteme genutzt werden. Gelingt es, den gesamten Abfluss eines Stollens technisch zu fassen, können **Messwehre** (z. B. Dreiecks-, Rechtecks- und Trapezwehre) oder **Messrinnen** (z. B. PARSHALL- bzw. VENTURI-Rinne oder RBC-Rinnen) zur Ermittlung des Abflussvolumens pro Zeiteinheit (Abfluss-, Durchflussrate) Einsatz finden (COLDEWEY UND GÖBEL 2015, WOLKERSDORFER 2008). Neben dieser direkten Messmethode werden in der Hydrometrie auch häufig Wasserstand-Abflussrate-Beziehungen genutzt, um die Entwicklung der Abflussrate langfristig zu beobachten. Dafür sind in einer ersten Phase an einem gut messbaren **Abflussquerschnitt A** die **Fließgeschwindigkeiten v** für verschiedene hydrologische Situationen (niedrige und hohe

Wasserstände; z. B. mit einem hydrometrischen Messflügel) zu ermitteln. Aus dem Abflussquerschnitt A und der Fließgeschwindigkeit v ergibt sich die Abflussrate \dot{V} ($\dot{V} = A \times v$), die dem jeweiligen **Wasserstand h** zugeordnet werden kann. Dieser sollte kontinuierlich mithilfe eines Datenloggers oder eines Schwimmerpegels erfasst werden. Über die in der Beobachtungsphase erstellte Wasserstand-Abflussrate-Beziehung (Regressionsfunktion) ist es dann möglich, in der folgenden Monitoringphase für jeden kontinuierlich gemessenen Wasserstand die Abflussrate \dot{V} zu ermitteln (MORGENSCHWEIS 2018). Mögliche temporäre Änderungen der Wasserstand-Abflussrate-Beziehung sind zu prüfen (Strömungshindernisse wie z. B. Verkrautung, Zweige, Baumstämme).

Tab. 7: Mess- und Anwendungsbereiche häufig verwendeter Abfluss-/Durchflussmessverfahren (ergänzt nach MORGENSCHWEIS 2018). Die Messgenauigkeit gilt nur dann, wenn alle Voraussetzungen der Methode erfüllt sind.

Mobile Messverfahren	Messflügel (horizontaler Propeller)	magnetisch-induktive Strömungs-sonde	Ultraschall-Doppler-Strömungs-sonde	Laser-Doppler-Strömungs-messer	Salzverdünnungsmethode
Messbereich	0,025–10 m/s	0,0–4,0 m/s	0,0–4,5 (6,0) m/s	0–4,6 m/s	bis zu 10 m ³ /s
Messgenauigkeit	5 %	1–3 %	5 %	0,50 %	0,4 – 5 %
Strömungstyp	weitgehend laminar	weitgehend laminar	weitgehend laminar	weitgehend laminar	turbulent
Anwendungsbereich	universell, Wasserstand > 5 cm	verkrautete / verschmutzte Gewässer, $v < 3$ cm/s, el. LF > 5 μ S/cm	Wasser und Abwasser	Oberflächen-nahen Punkt-messung, hohe Genauigkeit	höchste Genauigkeit, im Mischungsbereich turbulent

¹ Die hier aufgeführten Werte stellen erweiterte kombinierte Unsicherheiten im 95 %-Vertrauensbereich dar und können mitunter höher ausfallen; el. LF: elektrische Leitfähigkeit

Messwehre sollten möglichst aus Edelstahl bestehen. Die scharfe Abrisskante ist oberstromig anzubringen. Außerdem ist die Anlaufstrecke regelmäßig von Bewuchs oder Sediment zu befreien (Abb. 12). Die Anströmung an das Messwehr muss senkrecht erfolgen und es muss unterstromig eine ausreichende Überfallhöhe gewährleistet sein. Ist dies alles nicht der Fall, können Messungenauigkeiten von 30 – 60 % auftreten. Die Höhe des Aufstaues sollte oberstromig mit einer Entfernung l zwischen Messwehr und Lattenpegel gemessen werden, die der 2- bis 4-fachen Höhe des höchsten Aufstaus h am Wehr entspricht ($l = 2h$ bis $4h$). Zur Sicherstellung exakter Messungen ist unbedingt eine Überprüfung oder Kalibrierung der Messwehre vorzunehmen. Die Abb. 12 zeigt

exemplarisch ein falsch konstruiertes Messwehr, das in diesem Fall durch den angeschweißten Vorbau keine scharfe Abrisskante aufweist, wodurch die Belüftung des Wassers nach dem Abriss am scharfen Wehr unterbunden wird.



Abb. 12: Verkrautetes Messgerinne und falsch konstruiertes Messwehr (Harz).

4 Zusammenfassung

Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) sind die Mitgliedsstaaten verpflichtet, den ökologischen und chemischen Zustand ihrer Gewässer zu erfassen und zu beurteilen (EU-WRRL 2014/101/EU). Da es in Deutschland bisher keine einheitliche Handlungsanleitung zur Beurteilung der potenziell von Bergwerken ausgehenden Kontaminationen gibt, sollte es Gegenstand dieses Leitfadens sein, Empfehlungen für eine repräsentative Beprobung und Untersuchung von Grubenwässern zusammenzustellen. Dies soll eine gleichbleibende Qualität und Vergleichbarkeit von Messprogrammen sicherstellen.

Nach einer Zusammenstellung der gesetzlichen Grundlagen zur Beurteilung der Qualität von Grund- und Oberflächenwässern in Deutschland befasst sich der Leitfaden schwerpunktmäßig mit der Beprobung und Analyse von Grubenwässern. Diese treten die in der Regel über Stollenmundlöcher zu Tage und münden von dort auf mehr oder weniger kurzen Weg in einen Vorfluter.

Je nach Zielsetzung müssen repräsentative Probenahmestellen ausgewählt werden. Steht die Beschaffenheit des Grubenwassers im Fokus, so muss unmittelbar bzw. so nah wie sicherheitstechnisch möglich am Stollenmundloch beprobt werden. Soll jedoch der Einfluss der Grubenwasserbeschaffenheit auf den Vorfluter beurteilt werden, so ist es empfehlenswert (1) unmittelbar vor der Mündung des Grubenwassers in den Vorfluter und (2) im Vorfluter kurz vor dem Zustrom (oberstromig) des Grubenwassers zu beproben. Die abstromige Probenahme nach ausreichender Durchmischungsstrecke ist vor allem dann relevant für die Ermittlung des Grubenwassereinflusses, wenn die Abflussraten nicht hinreichend genau ermittelbar sind.

Für die praktische Durchführung der Vor-Ort-Untersuchung, Probenentnahme für die Analytik bergbautypischer Wasserinhaltsstoffe und Messung der Abflussrate wurden im Dokument Gerätelisten zusammengestellt, relevante Parameter bzw. Abflussmessverfahren erläutert und Muster zu Probenahmeprotokollen dargestellt. Ebenso werden Empfehlungen für die Erstellung von Lageblättern und Datenblättern gegeben, die für ein langfristiges Monitoring sinnvoll sind bzw. dessen Ergebnisse übersichtlich bündeln können.

Der Praxisleitfaden wird durch eine abschließende Darlegung von drei Fallstudien aus den Bundesländern Sachsen und Bayern sowie Finnland abgerundet.

5 Quellenverzeichnis

5.1 Literatur

- ACKMAN, T. E.: An Introduction to the Use of Airborne Technologies for Watershed Characterization in Mined Areas. *Mine Water Environ.*, **22**(2), 62–68 (2003)
- BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG: Integrales Monitoring für den Grubenwasseranstieg im Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen. Konzeptbeschreibung. 10 S. (2020)
- BLA-GEO & LAWA: Hydrogeochemische Hintergrundwerte im Grundwasser und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. 22 S, www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Hintergrundwerte/sgd&law2015.pdf. Zugegriffen: 29.4.2020 (2015)
- BURGHARDT, D., COLDEWEY, W. G., MELCHERS, C., MESSER, J., PAUL, M., WALTER, T., WESCHE, D., WESTERMANN, S., WIEBER, G., WISOTZKY, F., WOLKERSDORFER, CH.: Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. COLDEWEY, W. G. [Hrsg.]: 79 S.; Neustadt/Wstr. (Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV) (2017)
- COLDEWEY, W. G., GÖBEL, P.: Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden. - 221 S.; Springer, Heidelberg (2015)
- DLR DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V.: Erdbeobachtungsprogramme. - online im Internet unter: <https://www.d-copernicus.de/programm/erdbeobachtungsprogramme/>. Zugegriffen: 16.10.2020 (2020)
- ERMITE CONSORTIUM, YOUNGER, P. L., WOLKERSDORFER, CH.: Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. *Mine Water Environ.*, **23**, 2–80; Springer, Heidelberg (2004)
- FGE EMS: Internationaler Bewirtschaftungsplan nach Artikel 13 Wasserrahmenrichtlinie für die Flussgebietsseinheit Ems, Bewirtschaftungszeitraum 2010–2015, www.ems-eems.de/fileadmin/co_theme/Default/Media/pdfs/2009_bwp_ems_de.pdf; Zugegriffen: 14.10.2019 (2010)
- HEDIN, R. S., NAIRN, R. W., KLEINMANN, R. L. P.: Passive Treatment of Coal Mine Drainage. *Bur. Mines Inf. Circ.*, **IC-9389**, 1–35 (1994)
- iDA: Interdisziplinäre Daten und Auswertungen, Datenportal iDA: www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida; Zugegriffen: 29.4.2020.
- KAISER, S.: Priorisierung von Wasserlösestollen des ehemaligen sächsischen Erzbergbaus für ein Monitoring der Abflussmengen vorflutbelastender Stollenwässer. Masterarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft der TU Dresden (2018)
- KÄSS, W.: Geohydrologische Markierungstechnik. In: MATTHESS, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie, **9**, 557 S.; Borntraeger, Berlin, Stuttgart (2004)
- KIRBY, C. S., CRAVOTTA, C. A., III: Net alkalinity and net acidity 1: Theoretical consideration. *Appl. Geochem.*, **20**(10), 1920–1940, doi:10.1016/j.apgeochem.2005.07.002 (2005a)
- KIRBY, C. S., CRAVOTTA, C. A., III: Net alkalinity and net acidity 2: Practical considerations. *Appl. Geochem.*, **20**(10), 1941–1961, doi:10.1016/j.apgeochem.2005.07.003 (2005b)
- KLÖCKNER, T.: Airborne Laserscanning als ergänzende Erkundungsmethodik von bergbaubedingten Kleinformen im Bochumer Süden (Ruhrgebiet). *scriptum online*, **8**, 1–47, Krefeld (2019)
- LEGLER, Ch., BREITIG, G., STEPPUHN, G., VOBACH, V.: Ausgewählte Methoden der Wasseruntersuchung. - **Bd. I**, Chemische, physikalisch-chemische und physikalische Methoden. Inst. f. Wasserwirtschaft, Berlin [Hrsg.]: 517 S.; VEB Gustav Fischer, Jena (1986)

- LFULG: Hydrologisches Handbuch Haupttabelle der mittleren Durchflusswerte Teil 4–6. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2017)
- LFULG: WRRL- in Sachsen (3. Bewirtschaftungszeitraum) – Bergbaubelastete Oberflächenwasserkörper. - www.bergbaufolgen.sachsen.de/download/bbb_OWK_Nov_2021c.pdf. Zugegriffen: 04.07.2023, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2021)
- LMBV – LAUSITZER UND MITTELDEUTSCHE BERGBAU-VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH.: Merkblatt – Montanhydrologisches Monitoring in der LMBV mbH. 35 S., Senftenberg (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH) (2019)
- MACLEOD, G.: Innovative Uses of LIDAR Technology to assist in the Remediation of former Coal Mine Sites. In: WOLKERSDORFER, Ch., FREUND, A. [Hrsg.]: Mine Water and Innovative Thinking - International Mine Water Association Symposium. 433–437; Cape Breton University Press, Sydney, NS (2010)
- MCLEMORE, V. T., SMITH, K. S., RUSSELL, C. C.: Sampling and Monitoring for the Mine Life Cycle: Management Technologies for Metal Mining Influenced Water, **6**, 191 S.; SME, Littleton (2014)
- MOORE, R. D.: Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement. Part 3: Slug injection using salt in solution. *Trans. Am. Mech. Eng.*, **45**, 285–341 (2005)
- MORGENSCHWEIS, G.: Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen - 2. Auflage; Springer, Berlin (2018)
- MUGOVA, E., WOLKERSDORFER, Ch.: Identifying potential groundwater contamination by mining influenced water (MIW) using flow measurements in a sub-catchment of the „Cradle of Humankind“ UNESCO World Heritage Site, South Africa. - *Environmental Earth Sciences*, **81(104)**, 12 S. (2022)
- OERTEL, S.: Grubenwasseraustritte und potentielle Grundwassergefährdungen in Bayern. 61 S., Bachelor-Arbeit an der Ludwig-Maximilians-Universität München (2007)
- REUMANN, G. M.: Erarbeitung einer MS-Access-Datenbank und eines WebGIS-fähigen, automatisch erzeugbaren Datenblattes für die Charakterisierung von Wasserlösteststellen des Erzbergbaus. Bachelorarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft der TU Dresden in Kooperation mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015)
- REUMANN, G. M., BURGHARDT, D.: Erarbeitung von Datenblättern zu charakteristischen Daten, Lage und empfohlenen Messpunkt für bedeutsame Grubenwasseraustritte in Sachsen (unveröffentlicht; Übergabe an das LfULG) (2019)
- SÄCHSISCHES OBERBERGAMT: Wichtige Wasserlösteststellen in Sachsen. - www.bergbaufolgen.sachsen.de/download/2023_02_KarteWasserloestestolln.pdf. Zugegriffen: 04.07.2023 (2023)
- SIOTKA, B.: Hydrogeochemische Untersuchung der Grubenwasseraustritte des ehemaligen bayerischen Pechkohlebergbaus. 90 S., Bachelorarbeit an der Ludwig-Maximilians-Universität (2008)
- STEUER, H., ZIMMERMANN, U.: Alter Bergbau in Deutschland: Archäologie in Deutschland - SH 1993. 127 S.; Nikol, Hamburg (2000)
- WENZEL, A., SCHLICH, K., SHEMOTYUK, L., NENDZA, M.: Revision der Umweltqualitätsnormen der Bundes-Oberflächengewässerverordnung nach Ende der Übergangsfrist für Richtlinie 2006/11/EG und Fortschreibung der europäischen Umweltqualitätsziele für prioritäre Stoffe. - Umweltbundesamt [Hrsg.]: **UBA-Texte 47**, 193 S.; Dessau-Roßlau (UBA) (2015)
- VARMA, A.: The copper-zinc ore deposits of Aijala and Metsämonttu. *Geol. Tutkimuslaitos*, **55**, 20–24 (1954)
- WAGNER, B., BEER, A., BITZER, F., BROSE, D., BRÜCKNER, L., BUDZIAK, D., CLOS, P., FRITSCHE, H. G., HÖRMANN, U., HÜBSCHMANN, M., MOOSMANN, L., NOMMENSEN, B., PANTELEIT, B., PETERS, A., PRESTEL, R., SCHUSTER, H., SCHWERDTFEGER, B., WALTER, T., WOLTER, R.: Erläuterung zum Web Map Service (WMS) „Hintergrundwerte Grundwasser“. 24 S.; Hof (2014)

- WIEBER, G.: Das ehemalige Erzrevier an der Unteren Lahn: hydro- und geochemische sowie umweltgeologische Verhältnisse unter Berücksichtigung der Rückstände aus der Erzaufbereitung. Gießener Geologische Schriften, **52**, 284 S.; Gießen (1994)
- WIEBER, G.: Hydrogeologie und Wärmefluss der gefluteten Grube Mercur in Bad Ems, Rheinisches Schiefergebirge. Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., **N. F. 96**, 361–377; Stuttgart (2014)
- WOLKERSDORFER, CH., BANTELE, M.: Die Oberbayerische Pechkohlenmulde – Hydrogeochemische Untersuchungen der Grubenwässer. Grundwasser, **18(3)**, 185–196; Heidelberg (2013)
- WOLKERSDORFER, CH.: Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. 466 S.; Springer, Heidelberg (2008)
- WOLKERSDORFER, CH.: Grubenwasserreinigung - Beschreibung und Bewertung von Verfahren. 314 S.; Springer, Heidelberg (2021)
- YOUNGER, P. L., BANWART, S. A., HEDIN, R. S.: Mine Water - Hydrology, Pollution, Remediation. 464 S.; Kluwer, Dordrecht (2002)

5.2 DIN

Relevante Normen für die Untersuchung und Beprobung von (Stollen-)Wässern sind im Anhang 6.3 zusammengestellt.

5.3 Regelwerke, Richtlinien

- EU-GWRL: Richtlinie 2014/80/EU der Kommission vom 20. Juni 2014 zur Änderung von Anhang II der Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung (ABl. L 182 vom 21.6.2014), 52–55 (2014)
- EU-WRRL: Richtlinie 2014/101/EU der Kommission vom 30. Oktober 2014 zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpoltik (ABl. L 311 vom 31.10.2014), 32–35 (2014)
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: Durchflussermittlung mit der Salzverdünnungsmethode: Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg. 66 S.; Karlsruhe (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (2002)
- LAWA: Grundwasser-Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, 1, Grundwasserstand. 44 S., BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER; Woeste, Essen (1984)
- LAWA: Pegelvorschrift – Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER; Parey, Hamburg (1991)
- LAWA: Grundwasser – Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, 4, Quellen. – 63 S., 22 Abb., 4Tab., 2 Anl.; BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT; Woeste, Essen (1995)
- LAWA: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. 23 S.; Düsseldorf (2004)
- LAWA: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016. 23 S.; Stuttgart (2017)
- NLWKN: Leitfaden für die Bewertung des chemischen Zustands der Grundwasserkörper nach EG-WRRL, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 39 S.; Norden (2009)
- UMWELTBUNDESAMT: Wasserrahmenrichtlinie. www.umweltbundesamt.de/wasserrahmenrichtlinie vom 20. Juni 2016 (BGBI. S. 1373) (2016)

Weitere relevante Regelwerke für die Untersuchung und Beprobung von (Stollen-)Wässern sind im Anhang 6.3 zusammengestellt.

5.4 Gesetze, Verordnungen

BBERGG: Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBI. I S. 1310), zuletzt geändert durch Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBI. I S. 1328) (1980)

GRWV: Verordnung zum Schutz des Grundwassers. Grundwasserverordnung in der Fassung vom 9. November 2010 (BGBL. I S. 1513), zuletzt geändert durch Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBI. I S. 1044) (2010)

OBG NRW: Gesetz über Aufbau und Befugnisse der Ordnungsbehörden – Ordnungsbehördengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. Mai 1980 GV. NW. 1980 S. 528, zuletzt geändert durch Gesetz vom 30. Juni 2020 (GV. NRW. S. 456a) (1980)

OGEWV: Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBI. I S. 1373), zuletzt geändert durch Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBI. I S. 1328) (2016)

SÄCHSHOHLRVO: Sächsische Hohlraumverordnung vom 20. Februar 2012 (SächsGVBl. S. 191) (2012)

WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBI. I S. 2585), geändert zuletzt durch Gesetz vom 19. Juni 2020 (BGBI. I S. 1408) (2009)

6 Anhang

6.1 Parameterpaket

Empfohlener Analysenumfang für verschiedene Arten von Grubenwasseruntersuchungen. Fettgedruckte Parameter sind vor Ort zu bestimmen. Zusätzliche Parameter sollten je nach geologischen Verhältnissen oder vermuteter Geschichte des Bergwerks analysiert werden (ergänzt aus WOLKERSDORFER 2021, verändert aus ERMITE CONSORTIUM et al. 2004).

Parameter	Vor- untersuchung	Geochemische Untersuchungen	für Grubenwasser- reinigung	Zusätzliche Parameter
pH	X	X	X	
elektrische Leitfähigkeit	X	X	X	
Temperatur	X	X	X	
$K_{S4,3}$ oder $K_{S8,2}$		X	X	
$K_{B8,2}$ oder $K_{B4,3}$		X	X	
Sauerstoffkonzentration	X	X	X	X
Redox-Spannung (korr.)	X	X	X	
Organoleptik	X	X		
Ca		X		
Mg		X		
Na		X		
K		X		
Cl		X		
SO_4^{2-}	X	X	X	
NO_3^-		X		X
NH_4^+		X		X
PO_4^{3-}		X		
HCO_3^-	X	X	X	X
Li				X
Fe^{2+} , Fe_{ges}	X	X	X	
Mn		X	X	
Al		X	X	
Cu				X
Zn		X		X
Cd				X
Ni				X
Co				X
As				X

Parameter	Vor- untersuchung	Geochemische Untersuchungen	für Grubenwasser- reinigung	Zusätzliche Parameter
U			X	X
Cr				X
Pb				X
Hg				X
Se				X
Ra				X
Rn				X
CN ⁻				X
TOC / DOC / TIC				X
Organika (z. B. PCB)				X
Zusätzliche je nach Aufgabenstellung	X			X
Ionenbilanz (speziiert)		X		

6.2 Beispiel einer Checkliste für die Wasserprobenahme

Allgemeines Zubehör

- Lageplan, Karte, Navigationsgerät (Bestimmung des Rechts- und Hochwertes mit geodätischem Datum)
- analoges oder digitales Feld- oder Geländebuch (langfristige Dokumentation)
- Laptop
- Probenahmeprotokoll
- wasserfester Stift
- Aufkleber
- Messprotokolle
- Zollstock
- Bandmaß
- Kabellichtlot
- Uhr, Stoppuhr
- Verbandskasten
- Helm
- Gummistiefel
- Watstiefel, Wathose
- Einweghandschuhe
- Taschen-, Stirn- oder Grubenlampe mitsamt Ladegerät
- Spaten
- Spitzhacke
- Werkzeugkoffer für Kleinreparaturen
- Reinigungstücher, Reinigungsmittel
- Abfallbehälter
- Kabel (elektronisch)
- Kabeltrommel
- Eimer oder Messbecher mit Messskalierung, 5 – 10 L

Abflussmessung

- Durchflussmessgerät, Akku
- Messflügel
- Messwehr (Plastikhammer, Peilstab)
- Salz
- Uranin
- Wannen

Probenahme Wasser

- Spritzflasche mit destilliertem Wasser und Ersatzkanister
- Kühlboxen mit Kühlakkus und Flaschensätzen für Probenahme (ggf. vorbereitet und vorbeschriftet)
- Messzylinder _____ mL
- Messkolben _____ mL
- Messbecher
- Becher- bzw. Probenahmegläser Glas
- Probenahmegläser Kunststoff (50 mL – 500 mL) für Hauptionen
- Probenahmegläser Kunststoff (50 mL) für Spurenelemente
- Einwegspritzen
- Spritzvorsatzfilter, Membranfilter bzw. Vakuumfiltrationseinheit
 - 0,20 µm
 - 0,45 µm
- Schöpfbecher (zur Probenahme aus geringen Tiefen)
- Schöpfgerät (zur Probenahme aus größeren Tiefen)
- Seil mit Karabinerhaken

Vor-Ort-Untersuchung Beschaffenheit

- Feldmessgeräte mit dazu gehörigen (vorher kalibrierten) Messsonden und (Ersatz-)Batterien:
 - elektrische Leitfähigkeit
 - Temperatur
 - Sauerstoffkonzentration
 - pH-Wert
 - Redox-Spannung
- Multiparamettermessgerät (2- bzw. 4-Parametersonde)
- Fluorometer
- Küvetten
- Filtergerät mit Schlauch und Pumpe
- Photometer oder Kolorimeter für die Eisenbestimmung
- Nachweisreagenzien für Eisen
 - Fe^{2+}
 - $\text{Fe}_{\text{gesamt}}$
- Nachweisreagenzien für Sulfat
- Büretten (HCl bzw. NaOH), besser ein Handtitrator
- ggf. Trübungsmessgerät
- Kaliumchlorid (zur Sondenaufbewahrung)
- Salpetersäure (zum Ansäuern von Proben)

Pumpenzubehör (zusätzlich bei Erfordernis)

- Datenlogger
- Differenzdruckaufnehmer
- Batterie für Datenlogger Fluorimeter
- Seilwinde
- Seilwindenhalterung
- Dreibein
- Stahlseile _____ m
- Stahlseilhalterungen
- Schlauch _____ m
- Schlauchklemmen
- Magnetventile
- Verteilerköpfe mit Zubehör
- Speicherkarte

6.3 Relevante Normen und Regelwerke für die Untersuchung und Beprobung von Stollenwässern

Vorschrift	Titel	Version
Probenahme und Konservierung		
AQS-Merkblatt P-8/2	Probenahme von Grundwasser	1995
DIN 38402-A13	Probenahme aus Grundwasserleitern	2016
DIN 38402-A24	Anleitung zur Probenahme von Schwebstoffen	2007
DIN-EN ISO 5667-1	Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 1: Anleitung zur Erstellung von Probenahmeprogrammen und Probenahmetechniken	2007
DIN EN ISO 5667-3	Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 3: Konservierung und Handhabung von Wasserproben	2019
DIN EN ISO 5667-6	Anleitung zur Probenahme aus Fließwässern	2016
DIN-EN ISO 5667-11	Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 11: Hinweise zur Probenahme von Grundwasser	2009
DIN-EN ISO 5667-14	Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 14: Anleitung zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Entnahme und Handhabung von Wasserproben	2014
DVGW W 112 Arbeitsblatt	Grundsätze der Grundwasserprobenahme aus Grundwassermessstellen	2011
DWA-A 909	Grundsätze der Grundwasserprobenahme aus Grundwassermessstellen	2011
LAWA 1993	Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, Teil 3: Grundwasserbeschaffenheit	1993

Vorschrift	Titel	Version
Vor-Ort-Parameter		
DIN 38404-C4	Bestimmung der Temperatur	1976
DIN 38404-C6	Bestimmung der Redox-Spannung	1984
DIN 38404-C6	Bestimmung der Redox-Spannung, Berichtigung 1	2018
DIN 38409-H7	Bestimmung der Säure- und Basenkapazität	2005
DIN EN 27888	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit	1993
DIN EN ISO 9963	Bestimmung der Alkalinität	1996
DIN EN ISO 7027 (C2)	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der Trübung	1999
DIN EN ISO 10523 (C5)	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Wertes	2012
DIN ISO 17289 (G25)	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von gelöstem Sauerstoff mit optischem Sensor	2014
Analytik von Beschaffenheitsparametern		
DIN 32645	Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenzen	2008
DIN 38402-51	Kalibrierung von Analyseverfahren – Lineare Kalibrierfunktion	2017
DIN 38402-62	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Allgemeine Angaben (Gruppe A) – Teil 62: Plausibilitätskontrolle von Analysendaten durch Ionenbilanzierung (A 62)	2014
DIN 38409-H1	Bestimmung des Gesamtrockenrückstandes, des Filtrat-trockenrückstandes und des Glührückstandes	1987
DIN 38409-6	Härte eines Wassers	1986
DIN 38414-20	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 20: Bestimmung von 6 polychlorierten Biphenylen (PCB) (S 20)	1996
DIN EN 1483	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Quecksilber – Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie	2007
DIN EN 1484	Wasseranalytik – Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)	2019
DIN EN ISO 7027-1	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der Trübung	2016
DIN EN ISO 7887-B	Wasserbeschaffenheit – Untersuchung und Bestimmung der Färbung mit optischen Geräten bei den Wellenlängen $\lambda = 436$ nm, $\lambda = 525$ nm, $\lambda = 620$ nm	2012
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

Vorschrift	Titel	Version
DIN EN ISO 11732	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Ammoniumstickstoff – Verfahren mittels Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion	2005
DIN EN ISO 11885	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektroskopie (Al, Sb, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Ga, In, Fe, Pb, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, P, K, Se, Si, Ag, Na, Sr, S, Sn, Ti, W, V, Zn, Zr)	2009
DIN EN ISO 12846	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Quecksilber – Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) mit und ohne Anreicherung	2012
DIN EN ISO 13395	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Nitritstickstoff, Nitratstickstoff und der Summe von beiden mit der Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion	1996
DIN EN ISO 14403-1	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Gesamtcyanid und freiem Cyanid mittels Fließanalytik (FIA und CFA) – Teil 1: Verfahren mittels Fließinjektionsanalyse	2012
DIN EN ISO 14911	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der gelösten Kationen Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} und Ba^{2+} mittels Ionenchromatographie	1999
DIN EN ISO 15681-1	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Orthophosphat und Gesamtphosphor mittels Fließanalytik (FIA und CFA)	2005
DIN EN ISO 17294-2	Wasserbeschaffenheit – Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) – Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (Al, Sb, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Cs, Ca, Ce, Cr, Co, Cu, Dy, Er, Gd, Ga, Ge, Au, Hf, Ho, In, Ir, Fe, La, Pb, Li, Lu, Mg, Mn, Hg, Mo, Nd, Ni, Pd, P, Pt, K, Pr, Rb, Re, Rh, Ru, Sm, Sc, Se, Ag, Na, Sr, Tb, Te, Th, Tl, Tm, Sn, W, U und seiner Isotope, V, Y, Yb, Zn, Zr)	2016
DIN EN ISO 38405-D 13-1	Bestimmung von Cyaniden	2011
DIN ISO 28540	Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von 16 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Wasser – Verfahren mittels Gaschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (GC-MS)	2014

Messung der Abfluss- und Durchflussrate

ATV-DVWK M 604	Messeinrichtung an Quellen	2002
DIN 4049-1	Hydrologie; Grundbegriffe	1992
DIN 4049-2	Hydrologie; Begriffe der Gewässerbeschaffenheit	1990

Vorschrift	Titel	Version
DIN 19559-1	Durchflussmessung von Abwasser in offen Gerinnen und Freispiegelleitungen	1983
DIN EN ISO 748	Hydrometrie – Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten oder Schwimmern	2008
DIN EN ISO 6416	Hydrometrie – Messungen des Durchflusses mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren (Transit-time/Time-of-flight-Verfahren)	2019
ISO 9555	Measurement of Liquid Flow in Open Channels. Tracer Dilution Methods for the Measurement of Steady Flow	1994
ISO 9123	Abflussmessung in offenen Gerinnen – Wasserstands-Abflussbeziehungen (Englisch)	2017

DVWK-Merkblätter und Schriften

DVWK-Material 1/1994	Bewertung und Auswertung hydrochemischer Grundwasseruntersuchungen	1994
DVWK-Merkblatt 203	Entnahme von Proben für hydrogeologische Grundwasseruntersuchungen	1982
DVWK-Regel 111	Empfehlungen zu Umfang, Inhalt und Genauigkeitsanforderungen bei chemischen Grundwasseruntersuchungen	1979
DVWK-Regel 128	Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben	1992
DVWK-Schriften 89	Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten	1990
DVWK-Schriften 107	Grundwassermessgeräte	1994

6.4 Vorlage für ein Probenahmeprotokoll für Grubenwasser

Probenahmeprotokoll für Grubenwasser

Seite 1/2

Name des Bergwerks	Probenummer						
Bezeichnung der Messstelle	Projektname						
Gemeinde / Ortsteil	Landkreis						
R-Koordinaten	H-Koordinaten	geodätisches Datum	Projektnummer				
Geländehöhe	<input type="checkbox"/> müNHN	<input type="checkbox"/> „GPS“-Höhe	Datum	Uhrzeit			
Messpunkt Höhe	TK Nummer	Witterung	°C				
Name und ggf. Qualifikation der Probenehmer		Institution der Probenehmer					
Beschreibung der Probenahmestelle							
<input type="checkbox"/> Rösche		<input type="checkbox"/> Rohr	<input type="checkbox"/> Rinne	<input type="checkbox"/> Sickerwasseraustritt			
<input type="checkbox"/> Schacht		<input type="checkbox"/> Quelle	<input type="checkbox"/> freier Auslauf	<input type="checkbox"/> Grundwassermessstelle	<input type="checkbox"/> Anderes		
Ausbau der Entnahmestelle							
<input type="checkbox"/> Mauerwerk		<input type="checkbox"/> Kunststoffrohr	<input type="checkbox"/> verzinktes Rohr	cm			
<input type="checkbox"/> Steinzeug		<input type="checkbox"/> Stahlrohr	<input type="checkbox"/> Gerinne ohne Ausbau	Rohr/Schachtdurchmesser			
Art der Probenahme							
<input type="checkbox"/> Schöpfbecher		<input type="checkbox"/> Schöpfapparat	<input type="checkbox"/> Plastik	<input type="checkbox"/> Metall			
<input type="checkbox"/> Pumpprobe (Saug- bzw. Unterwasserpumpe)		Probenvolumen		Entnahmetiefe			
Probengefäße und Probenkonservierung							
Anzahl / Volumen der Gefäße		Porengröße Filter	Anzahl / Volumen der Gefäße		Porengröße Filter		
<input type="checkbox"/> Glas, hell		<input type="checkbox"/> Glas, dunkel	<input type="checkbox"/> Kunststoff	<input type="checkbox"/> Glas, hell		<input type="checkbox"/> Glas, dunkel	<input type="checkbox"/> Kunststoff
<input type="checkbox"/> gefiltert		<input type="checkbox"/> ungefiltert	<input type="checkbox"/> angesäuert	<input type="checkbox"/> gefiltert		<input type="checkbox"/> ungefiltert	<input type="checkbox"/> angesäuert
Konservierungsmittel	Menge	Konservierungsmittel		Menge			
Transport- und Lagerbedingungen							
<input type="checkbox"/> Kühlung bei < 6 °C <input type="checkbox"/> Tiefgefroren (< -18 °C) <input type="checkbox"/> Ohne Kühlung							
Übergabe der Proben an die Untersuchungsstelle/Labor							
Name des Untersuchungslabors		Datum	Uhrzeit				
Bemerkungen zur Lokalität							

Probenahmeprotokoll für Grubenwasser

Seite 2/2

Name der Probenehmer		Probenummer	
Färbung	Geruch	Trübung	Gasbildung
Wassertemperatur °C	Elektrische Leitfähigkeit µS/cm	pH-Wert -	Sauerstoff mg/L
Redox-Spannung mV	Redox-Spannung mV	Ab-/Durchfluss L/s	Messmethode Abfluss
Fe _{ges} mg/L	Fe _{ges} Verdünnung : mL	Fe ²⁺ mg/L	Fe ²⁺ Verdünnung : mL
Titration <input type="checkbox"/> kalt <input type="checkbox"/> heiß		Messmethode Fe	
<input type="checkbox"/> NaOH <input type="checkbox"/> End-pH 4,3	Probevolumen mL	<input type="checkbox"/> N	Volumen Säure/Base mL
<input type="checkbox"/> H ₂ SO ₄ /HCl <input type="checkbox"/> End-pH 8,2	Normalität		
<input type="checkbox"/> NaOH <input type="checkbox"/> End-pH 4,3	Probevolumen mL	<input type="checkbox"/> N	Volumen Säure/Base mL
<input type="checkbox"/> H ₂ SO ₄ /HCl <input type="checkbox"/> End-pH 8,2	Normalität		
Referenztemperatur °C			
Verwendete Elektroden für pH und Redox-Spannung			
Fotenummern			

Lageskizze und Notizen

Bemerkungen zur Probenahme und Probe

6.5 Adressen der Bergbehörden in Deutschland

BADEN-WÜRTTEMBERG

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und
Bergbau Baden-Württemberg
Albertstraße 5, 79102 Freiburg/Breisgau
Tel.: 0761 208-3000
www.lgrb.uni-freiburg.de

BAYERN

Die Aufgaben der Landesbergbehörde werden im Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie wahrgenommen:
Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
Prinzregentenstraße 28, 80538 München
Tel.: 089 2162-0
www.stmwi.bayern.de

BERLIN

Die Aufgaben der Landesbergbehörde in Berlin übernimmt das Landesbergamt Brandenburg:
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Inselstraße 26, 03046 Cottbus
Tel.: 0355 48640-0
www.lbgr.brandenburg.de

BRANDENBURG

Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Inselstraße 26, 03046 Cottbus
Tel.: 0355 48640-0
www.lbgr.brandenburg.de

BREMEN

Die Aufgaben der Landesbergbehörde für Bremen übernimmt das Landesbergamt Niedersachsen:
Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stilleweg 2, 30655 Hannover
Tel.: 0511 643-0
www.lbeg.niedersachsen.de

HAMBURG

Die Aufgaben der Landesbergbehörde für Bremen übernimmt das Landesbergamt Niedersachsen:
Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Hamburg
Stilleweg 2, 30655 Hannover
Tel.: 0511 643-0
www.lbeg.niedersachsen.de

HESSEN

Regierungspräsidium Darmstadt
Abt. Arbeitsschutz und Umwelt
Wiesbaden Dezernat 44
Lessingstraße 16 – 18, 65189 Wiesbaden
Tel.: 0611 3309-0
www.rp-darmstadt.hessen.de

MECKLENBURG-VORPOMMERN

Bergamt Stralsund
Frankendamm 17, 18439 Stralsund
Tel.: 03831 6121-0
www.bergamt-mv.de

NIEDERSACHSEN

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stilleweg 2, 30655 Hannover
Tel.: 0511 643-0
www.lbeg.niedersachsen.de

NORDRHEIN-WESTFALEN

Bezirksregierung Arnsberg
Abt. 6 „Bergbau und Energie in NRW“
Goebenstraße 25, 44135 Dortmund
Tel.: 02931 82-0
www.bezreg-arnsberg.nrw.de

SACHSEN

Sächsisches Oberbergamt
Kirchgasse 11, 09599 Freiberg
Tel.: 03731 3720
www.oba.sachsen.de

THÜRINGEN

Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz
Göschwitzer Straße 41,
07745 Jena
www.tlubn.thueringen.de

6.6 Fallbeispiele

Die folgenden Fallbeispiele wurden von der Autorin und dem Autor ausgewählt, um spezielle Sachverhalte aufzuzeigen und obliegen deren Verantwortung.

6.6.1 Sachsen [Diana Burghardt]

In Sachsen fand in den vergangenen Jahrhunderten ein intensiver Erzbergbau statt, der zahlreiche Wasserlösestollen mit Arsen- und metallhaltigen Stollen- und Grubenwässern hinterließ. So bedingt die Schadstofffracht aus einigen Wasserlösestollen auch heute noch eine Überschreitung der entsprechenden Umweltqualitätsnormen (UQN) in den Fließgewässern, in die sie münden (Abb. 13, Bereich Altbergbau).

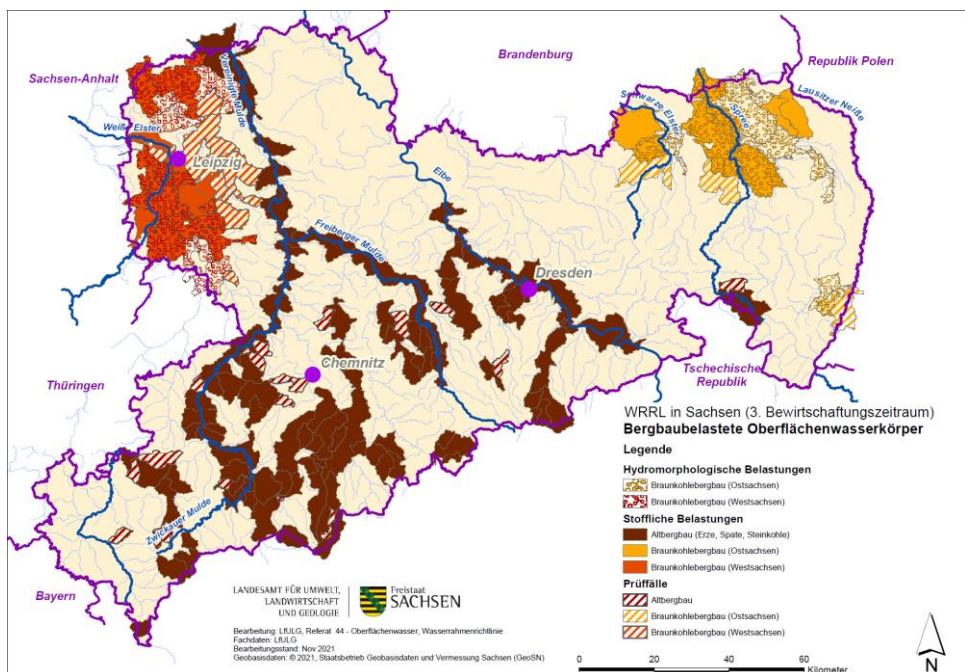


Abb. 13: Bergbaubeeinflusste Oberflächenwasserkörper (LfULG 2021).

Eine Verfehlung des gemäß EU-WRRL bis spätestens 2027 zu erreichenden, guten Zustandes dieser Gewässer ist deshalb zu erwarten. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) lässt deshalb neben der Beschaffenheit der Oberflächengewässer auch an einer priorisierten Auswahl von 54 Stollenmundlöchern (Abb. 14) 4- bis 12-mal jährlich die Beschaffenheit der Stollenwässer analysieren. Diese Daten sind über das Umweltportal „Interdisziplinäre Daten und Auswertung“ (iDA) des Freistaates Sachsen online verfügbar. Der Volumenstrom eines Oberflächengewässers wird mittels amtlicher Pegelmessungen berechnet und ist online einsehbar (LfULG 2017).

Abflussraten der Stollenwässer werden durch das Sächsische Oberbergamt (SOBA) bisher nur stichpunktartig oder überschlägig erfasst und stehen noch nicht öffentlich zur Verfügung. Zudem befinden sich die amtlichen Beschaffenheitsmessstellen der Oberflächengewässer nicht an den Pegeln, die der Bestimmung der Abflussraten dienen.

Die bisher vorliegende Datengrundlage ist somit unzureichend, um Frachtanteile von Schadstoffen aus Stollen zu ihren Vorflutern oder ihre bergbaubürtigen Anteile der Schadstoffe in den Fließgewässern abschätzen zu können. Eine Bilanzierung von Schadstoffquellen für Oberflächenwasserkörper ist jedoch eine wichtige Beurteilungsgrundlage, um Maßnahmen zur Verminderung von Bergbaufolgen zu planen und die Ziele der EU-WRRL zu erreichen. Aufgrund der vorliegenden Datensituation war es Gegenstand einer Studie, die sächsischen Wasserlöstollen für ein Monitoring der Abflussraten nach den folgenden vier Kriterien zu priorisieren (KAISER 2018):

- **K₁** Flussordnungszahl
- **K₂** Abflussratenverhältnis Stollen : Vorfluter
- **K₃** Belastung der Stollenwässer (As, Cd, Zn)
- **K₄** Zugänglichkeit und Repräsentativität einer gemeinsamen Beschaffenheits- und Abflussmessstelle.

Im ersten Schritt der Arbeit erfolgte eine Aufbereitung des vorliegenden Datenbestandes (Trendanalysen von Beschaffenheitsdatenreihen, Abflussdaten MQ, MNQ aus hydrologischen Handbüchern, Information zum Abfluss und Sanierungsstand der sächsischen Stollenmundlöcher), um über die Ermittlung von Frachtanteilen der Stollen eine erste Vorauswahl für deren Abflussmonitoring treffen zu können. Für diese Stollen erfolgte anschließend eine Befahrung mit Messung der Abflussrate und Beschaffenheitsuntersuchung. Da eine Beschaffenheitsuntersuchung direkt am Mundloch des Stollens oftmals nicht repräsentativ für den tatsächlichen Beitrag der Schadstofffracht des Stollenwassers zum Vorfluter ist, wurden alle Beprobungen der Stollenwasser unmittelbar vor der Mündung des Stollenwassers in den Vorfluter durchgeführt und diese Position protokolliert. Untersuchungen zu einer ausschließlichen Beprobung des Vorfluters unmittelbar vor bzw. nach unterschiedlichen Einmischlängen nach Einmündung des Grubenwassers erbrachten, dass diese Methodik eine sehr aufwändige, standortspezifische Qualitätsprüfung einer vollständigen Einmischung erfordern würde. Da diese Einmischung zusätzlich in Abhängigkeit der hydrologischen Verhältnisse variiert, ist eine alleinige Beschaffenheitsprobenahme im Vorfluter nicht empfehlenswert.

Aus dem Ergebnis der Vorauswahl und der Befahrungen wurde eine Priorisierungsliste gemäß der Kriterien K₁ – K₃ erstellt (Tab. 8). Dabei betrug der Anteil des Stollenwassers am Gesamtabfluss bei fünf Stollen mehr als 10 %. Insgesamt zehn Stollenwasserzuflüsse waren ursächlich für eine mehrfache (> 1) Überschreitung der zulässigen UQN-Grenzwerte für As, Cd und oder Zn im Vorfluter (Tab. 1) verantwortlich.

Für jeden der Stollen, der für ein regelmäßiges Abflussratenmonitoring vorgeschlagen wurde, wurden detaillierte Informationen zu charakteristischen Daten, Probenahmeort und -stelle sowie räumlicher Einordnung zu den amtlichen Pegeln und Beschaffenheitsmessstellen auf einem Datenblatt (Abb. 15) zusammengestellt (Kriterium K₄; REUMANN UND BURGHARDT 2019).

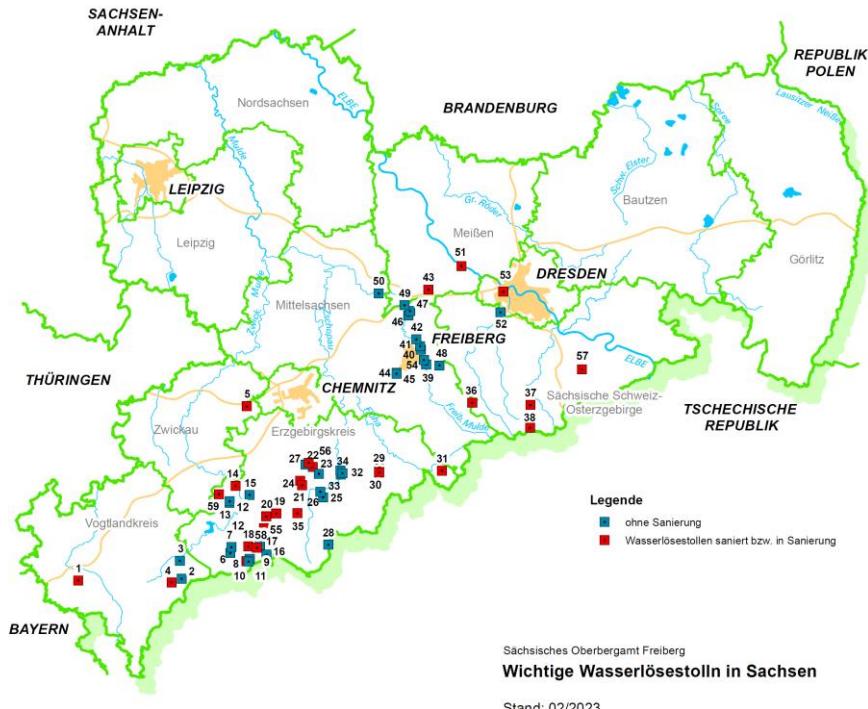


Abb. 14: Darstellung wichtiger Wasserlösestollen in Sachsen (Sächsisches Oberbergamt 2023, verändert; Lfd.-Nr. Stollnbezeichnung: 1 Brüder Einigkeit Stolln, 2 Mühleither Stolln (Dynamostolln), 3 Stolln Jägersgrün, 4 Wasserlösungsstolln zum Maischacht, 5 Lampertusstolln, 6 Eibenstocker Communstolln, 7 Tiefer Riesenberger Stolln, 8 Friedrich August Stolln, 9 Stolln 146, 10 Aaron Stolln, 11 Glück Auf Stolln, St. Georg Stolln, 12 Heßmühlenstolln, 13 Unterer Troster Stolln, 14 Markus Semmler Stolln, 15 Tiefer Reichenbach Stolln, 16 Oberer und Tieferer Segen Gottes Stolln (Stolln 336), 17 St. Christoph Stolln, 18 Roter und Weißer Löwe, 19 Frisch Glück Stolln, 20 Treue Freundschaft Stolln, 21 Tiefer Haupt- oder Hüttenstolln, 22 Tiefer Sauberger Stolln, 23 Großvierunger Stolln, 24 Hirtenstolln, 25 Reiche Empfängnis Stolln, 26 Tiefer St. Christoph Stolln, 27 Tiefer König Dänemark Stolln, 28 Stolln 111, 29 Königlich Weißtaubner Tiefer Erbstolln, 30 Walfischstolln, 31 Tiefer Heilige Dreifaltigkeit Stolln, 32 Tropper Stolln, 33 Tiefer Hilfe Gottes Stolln, 34 Neuglück(er) Stolln, 35 Tiefer Erbstolln, 36 Tiefer Friedrich Christoph Erbstolln, 37 Neuer Bielastolln, 38 Tiefe Hilfe Gottes Stolln, 39 Schieferleithe Stolln, 40 Königl. Verträgliche Gesellschaft Stolln, 41 Hauptstolln-Umbrauch, 42 Tiefer Lorenz Gegenrum Stolln, 43 Rothschönberger Stolln, 44 Thelersberger Stolln, 45 Sieben Planeten Stolln (Neuer Segen Gottes), 46 Tiefer Hilfe Gottes Stolln, Treue Sachsen Stolln, 47 Emanuel Erbstolln, Z/1750, 48 Friedrich Erbstolln, 49 Tiefer Wolf Stolln, 50 Adam Stolln, Segen Gottes Erbstolln, 51 Neuer König David Hilfsstolln, 52 Tiefer Weißenitz Stolln, 53 Tiefer Elbstolln, 54 Tiefe Morgensterner Abzugsrösche oder Tiefe Hüttenrösche, 55 St. Johannes Erbstolln, 56 Blei- und Silberzecher Stolln, 57 Tiefer Zwiesler Erbstolln, 58 Stollensystem Breitenbrunn, 59 Griefner Stolln).

Tiefer Wolf Stolln (TWS)

Charakteristische Daten:

Schadstoffe: As (130 µg/L), Cd (0,2 µg/L), Zn (19 µg/L)
Vorfluter: Freiberger Mulde (FZ 3; Q = 664 l/s)
Abfluss: 5 l/s (0,7 % am Gesamtabfluss Vorfluter)



Foto Mundloch



Lageskizze Mundloch

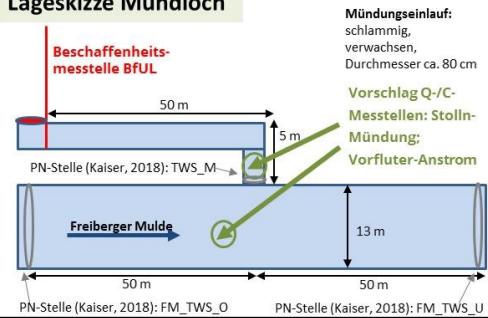


Abb. 15: Beispieldatenblatt nach dem Kriterium K₄ (Zugänglichkeit und Repräsentativität einer gemeinsamen Beschaffheits- und Abflussmessstelle) für die nach K₁ – K₃ priorisierten zehn Stollen.

Tab. 8: Priorisierung der sächsischen Wasserlösestollen für ein Abflussratenmonitoring auf Basis von KAISER (2018) und unter Verwendung von Daten aus dem Datenportal iDA (www.umwelt.sachsen.de).

Priorisierungs- kriterium für Abflussraten- monitoring	K ₁ : Flussordnungszahl	K ₂ : Abflussratenverhältnis Stollen : Vorfluter			K ₃ : Belastung der Stollenwässer		
		Stichtags- messung ^[1]	Anteil Stollenabfluss am Gesamt- abfluss, %	<i>x</i> -fache Überschreitung der für Vorfluter zul. Fracht			
Vorauswahl Wasserlösestollen	Flussordnungszahl/ Vorfluter	\dot{V}_{Stollen} L/s	$\dot{V}_{\text{Vorfluter}}$ L/s	As	Cd	Zn	
Tiefer Wolf Stolln	3 Freiberger Mulde	5	664	0,7	–	–	–
Glücksilberstolln	3 Freiberger Mulde	0,5 ⁽²⁾	730 ⁽³⁾	0,1	–	–	–
Königlich Verträglicher Gesellschaft Stolln	3 Freiberger Mulde	39	687	5,4	–	14,3	40,4
Hauptstolln- Umbruch	3 Freiberger Mulde	21	687	3,0	–	2,0	7,3
Reiche Empfängnis Stolln	5 Sehma	2	240	0,8	–	–	–
Tiefer St. Christoph Stolln	5 Sehma	40 ⁽²⁾	247	13,9	–	–	–
Tiefer König Dänemark Stolln	4 Zschopau	9	736	1,2	1,0	–	–
Tiefer Sauberger Stolln	5 Wilisch	79	118	40,1	64,4	–	2,3
Walfischstolln	7 Rote Pockau	45	170	20,9	2,3	1,0	2,3
Königlich Weißtaubner Tiefer Erbstolln	7 Rote Pockau	83	170 ⁽⁴⁾	32,8	4,3	6,3	14,2
Frisch Glück Stolln	6 Oßwaldbach	2	73	2,7	–	1,6	2,4
Treue Freundschaft Stolln	4 Schwarzwasser	23	1.980 ⁽⁵⁾	1,5	–	–	–
Tiefe Reichenbach Hoffnung Stolln	5 Kuttenbach	5	38	11,8	–	1,6	3,8
Stolln 146	4 Schwarzwasser	5	469	1,1	–	–	1,0
Breitenbrunn, St. Christoph Stolln	4 Schwarzwasser	6	469 ⁽⁵⁾	1,3	–	–	2,4

(1) Stichtagsmessungen im Zeitraum von April bis Juli 2018

(2) Messungen aufgrund der hydrologischen Verhältnisse nicht möglich: Schätzung

(3) Messung aufgrund der hydrologischen Verhältnisse nicht möglich: Pegel Berthelsdorf (20.06.2018)⁽¹⁾

(4) Messung aufgrund der hydrologischen Verhältnisse nicht möglich: Abflussrate Walfischstolln übernommen

(5) Messung aufgrund der hydrologischen Verhältnisse nicht möglich: Pegel Aue 1 (20.06.2018)⁽¹⁾

6.6.2 Bayerische Pechkohlenmulde [Christian Wolkersdorfer]

Zur Erfassung sämtlicher Grubenwasseraustritte in der Oberbayerischen Pechkohlenmulde wurden langjährige Untersuchungen durchgeführt (OERTEL 2007, SIOTKA 2008, WOLKERSDORFER UND BANTELE 2013). Zunächst wurde alle verfügbare Literatur ausgewertet, um Anhaltspunkte zu den historischen Bergwerksstollen zu finden. Des Weiteren wurden Bergbauvereine kontaktiert und ehemalige Bergleute befragt. Dadurch ließen sich die noch bekannten Austritte von Grubenwasser oder Stollen der letzten Bergbauperiode bis in die 1970er Jahre auffinden. Ältere Stollen ließen sich nicht lokalisieren. Aus fast 100 Publikationen, die bis 1792 zurückreichen, und Recherchen im Bayerischen Hauptstaatsarchiv, im Bergamt Südbayern sowie der E.ON Energie Deutschland GmbH wurden sämtliche Hinweise auf Stollen zusammengetragen. Vorhandene Karten wurden georeferenziert und in ein GIS übernommen (Abb. 16). Insgesamt ließen sich 44 historische Stollen nachweisen, die im Jahr 2008 teilweise mehrmals befahren wurden. In insgesamt 17 Stollen wurde Grubenwasser angetroffen.

Als problematisch erwies sich der Mangel historischer Grubenrisse oder Lagepläne. Zwar waren die Stollen aus dem 19. und 20. Jahrhundert bei der bergbauinteressierten Bevölkerung weitgehend bekannt, für die Zeit zwischen dem ersten Bergbau auf Pechkohle (ca. 1464 bis etwa 1764) und den ersten planmäßigen Aufzeichnungen fehlten jedoch jegliche Details. So bedurfte es mehrere Versuche, um den in der Literatur beschriebenen Abbau auf Pechkohle im Sulzergraben zu finden. Außer alten anthropogenen Veränderungen (z. B. Halden, Pingen) waren keine ehemaligen Stollen in der Natur zu erkennen (Abb. 17). Auch auf der Lagerstättenkarte von Bayern waren die älteren Stollen nicht verzeichnet.

Für den Bereich des Steinkohlenbergwerks bei Miesbach lagen detaillierte Flözkarten vor (Abb. 16). Dennoch war es nach 145 Jahren nicht mehr möglich, die Schächte oder Grubenwasseraustritte zu lokalisieren.

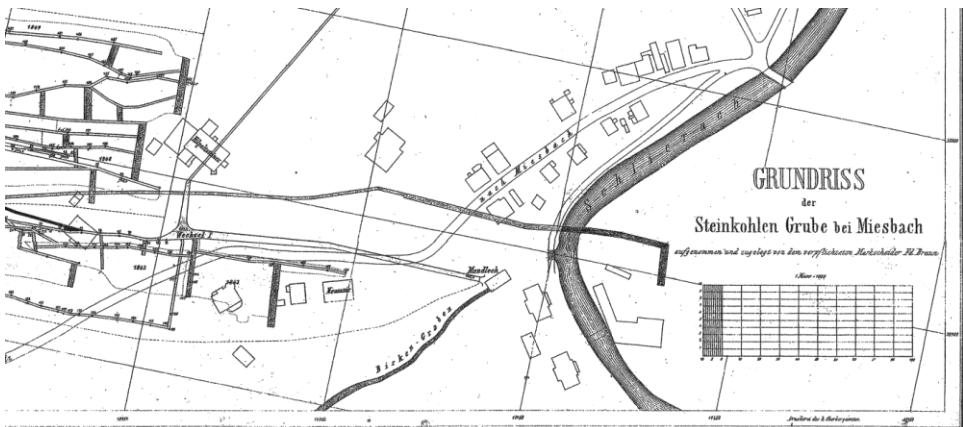


Abb. 16: Ausschnitt aus der Flözkarte des Bergwerks bei Miesbach (Ende des 19. Jahrhunderts; Archiv Wolfgang Bloch).



Abb. 17: Heutige Situation am Sulzergraben.

In einem Fall war ein Stollen durch eine Deponie überschüttet. Mittels Leitfähigkeitsmessungen in einem Bach, der aus Richtung der Deponie kam, ließ sich jedoch der umgeleitete Grubenwasseraustritt lokalisieren. In einem anderen Fall waren die Unterlagen im Archiv fehlerhaft beschriftet (Leitzach-Stollen anstelle Ventilatorstollen). Im Röthengraben, dessen Bezeichnung auf „rotes“ Grubenwasser schließen lassen könnte, wurde Grubenwasser von einem Anwohner vermutet. Es zeigte sich allerdings, dass das Oberflächenwasser durch Tannin gefärbt war (Abb. 18).



Abb. 18: Mischung von durch Tannin bräunlich gefärbten Bachwasser aus dem Röthengraben und klarem Wasser des Wilpartinger Grabens.

Erschwerend kam bei den Untersuchungen hinzu, dass die vorhandenen Karten teilweise im SOLDNER-Koordinatensystem, ein heute nicht mehr gebräuchliches, lokales Koordinatensystem vorlagen. Software-gestützte Umrechnungen ergaben abweichende Positionen für die Stollenmundlöcher.

An allen Grubenwasseraustritten wurde die Abflussrate mittels Salzverdünnungsmethode oder einer volumetrischen Methode ermittelt. Darüber hinaus erfolgten mehrere Probenahmekampagnen, um repräsentative Grubenwasseranalysen zu erhalten. Am Ventilatorstollen an der Leitzach ergriff die Bayerische Landesregierung Maßnahmen, um die Wasserqualität zu verbessern.

6.6.3 Finnland [Christian Wolkersdorfer]

Am aufgelassenen Polymetallbergwerk Metsämonttu in Südwestfinnland (VARMA 1954) sollten in zwei Bergwerksschächten die chemischen Wasserparameter erfasst werden. Schacht 1 (Messstelle MSD) weist eine Teufe von etwa 250 m und Schacht 2 (Messstelle MS2) von etwa 650 m auf. Letzterer war zum Zeitpunkt des Abteufens der tiefste Schacht in Finnland. Ein Wasserprobenehmer aus transparentem PVC (PVC BioBailers™) mit einem Verschlussball am Ende des Rohres wurde eingesetzt. Dieser wurde manuell an einer 500 m Seilwinde in den jeweiligen Schacht hinabgelassen. In jeweils vier bis sechs Teufen wurden insgesamt bis zu neun Wasserproben entnommen. Da die chemischen Messergebnisse nicht im Einklang standen mit den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit in verschiedenen Teufen, erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt eine Vergleichsmessung mit einem Probenehmer aus Edelstahl. Dieser wurde in die gleichen Teufen hinabgelassen, erst bei Erreichen der Teufe geöffnet und war während des Aufholens geschlossen. Wie sich zeigte, liefern die Probenahmen mit dem BioBailer bei den großen Teufen eines Bergwerksschachts keine repräsentativen Ergebnisse (Tab. 9). Nur die stratifizierte Probenahme mit Probenehmern, die schließlich in der entsprechenden Teufe geöffnet werden, kann als zuverlässig angesehen werden.

Tab. 9: Messergebnisse von Teufenprobenahmen mit einem teiloffenen PVC und geschlossenen Edelstahl Wasserprobenehmer am Bergwerk Metsämonttu in Finnland am Schacht 1 und Schacht 2. Konzentrationen in mg/L.

Messtelle	Teufe, m	BioBailer (August 2015)				Edelstahl teufenorientiert (Juni 2018)			
		SO ₄ , mg/L	Cl, mg/L	Ca, mg/L	Fe, mg/L	SO ₄ , mg/L	Cl, mg/L	Ca, mg/L	Fe, mg/L
MSD	15	230	3,8	120	7,8	210	4,8	99	6,8
	65	230	3,7	110	7,7	200	4,0	97	6,5
	145	240	3,8	110	8,0	590	10,0	210	11,0
	214	240	3,9	120	8,2	600	10,0	220	13,0
MS2	13	26	2,5	34	0,6	—	—	—	—
	95	24	2,4	34	0,6	27	2,3	32	0,4
	220	78	3,3	38	0,9	590	9,1	200	9,5
	290	41	3,7	53	2,0	2.800	560	530	34
	350	—	—	—	—	2.800	550	560	36
	500	—	—	—	—	2.800	560	560	36

Der vorliegende Leitfaden gibt einen Überblick über Grundlagen und Methoden zur fachgerechten und repräsentativen Probenahme von Grubenwasser aus Stollen, die sich in langjähriger, nationaler und internationaler Praxis bewährt haben. Vielfältige Hinweise und Empfehlungen sollen dazu beitragen, die Qualität der Probenahme weiter zu verbessern. Der Leitfaden beleuchtet im Wesentlichen die folgenden Aspekte:

- Begriffserläuterungen
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Normen und Regelwerke
- Auswahl der Probenahmestelle
- Geräte und Ausrüstung für die Probenahme und Abflussmessung
- Besonderheiten bei der Probenahme in untertägigen Bergwerksanlagen
- Vor-Ort-Untersuchung
- Probenvolumina und Probenpräparation für die instrumentelle Analytik
- Analytik weiterer Parameter
- Empfehlungen zur Dokumentation
- Probenbezeichnung
- Abflussmessung

In Bochum wurde im Jahr 2015 der Arbeitskreis Grubenwasser der Fachsektion Hydrogeologie e. V. in dem Deutsche Geologische Gesellschaft - Geologische Vereinigung e. V. (FH-DGGV) gegründet, um das Fachwissen auf dem Gebiet des Grubenwassers zu bündeln und es seinen Mitgliedern und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Naturwissenschaftler und Ingenieure mit langjähriger Erfahrung im Bereich der universitären Lehre, der Behörden und der Bergbauindustrie wirken darin mit, um das vorgenannte Ziel umzusetzen. So wurde in erstem Schritt im Jahr 2017 das Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft erstellt, das über 450 Begriffe aus diesem Tätigkeitsbereich abhandelt.