

# Hydrogeologie und Wasserwirtschaft der Grubenwässer des ehemaligen Buntmetallerzbergbaus im Hunsrück, Rheinisches Schiefergebirge

GEORG H. E. WIEBER

**Kurzfassung:** Im Hunsrück (Rheinisches Schiefergebirge) ging ein intensiver Erzbergbau um. Die Erzvorkommen waren jedoch überwiegend nur von mittlerer bis geringer Bedeutung und wurden dementsprechend meist in Bergwerken geringer Größe und Teufe abgebaut. Daher sind auch die Schüttungen der auslaufenden Grubenwässer gering und zudem meist nur gering mineralisiert. Eine Ausnahme stellt die Grube Gute Hoffnung mit einer Gesamtteufe von über 800 Metern dar. Die letzten Bergwerke wurden in den 1960er Jahren geschlossen und geflutet. Die Grubenwässer stiegen bis auf das Niveau der morphologisch tiefsten Tagesöffnung an und fließen von dort in freiem Gefälle zum nächsten Vorfluter. Durch die Oxidation von (Di-)Sulfiden können saure Grubenwässer entstehen und erhebliche Frachten toxischer Spurenelemente freisetzen.

In den wenigen bedeutenderen Gruben entstanden aber auch bedeutende Wasserreservoirs, die in der Vergangenheit teilweise als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung genutzt wurden. Saure Grubenwässer mit hohen Buntmetallfrachten sind auf wenige Einzelfälle beschränkt und haben keinen maßgeblichen Einfluss auf die chemische und ökologische Gewässergüte der Gewässer.

**Abstract:** The Hunsrück Mountains (Rheinisches Schiefergebirge) have a history of intensive and abundant ore mining. The last mines were closed and flooded in the 1960s. The mine water rose up to the level of the morphologically lowest adits with direct contact to the surface and flows from there to the receiving surface water. The oxidation of (di-)sulphides can cause acidic mine water and release toxic trace elements. However, ore mining in the Hunsrück was characterized by less significant ore deposits, which were mined in workings of small size and depth. The amount of mine water is correspondingly small, which also shows only a low level of mineralization. In the few more important mines however, significant water reservoirs were created, some of which were used in the past as raw water for drinking water production. Acidic mine waters with high non-ferrous metal loads are limited to a few individual cases and hardly have any influence on the chemical and ecological water quality.

## 1. Einleitung

In den deutschen Mittelgebirgen ging ein umfangreicher Bergbau auf Eisen - und Nichteisenerze (NE-Erze) um (u.a. HERBST & MÜLLER 1966; KRONZ 2005; WIEBER 1994). Im Rheinischen Schiefergebirge wurden die letzten Gruben in den 1960er Jahren stillgelegt. Gegenstand der in dieser Arbeit erfassten und untersuchten Bergwerke sind die Erzgruben des Hunsrücks. Es handelt sich dabei überwiegend um sulfidische Buntmetallerzlagerstätten. Gangminerale sind vor allem "silberhaltiger Bleiglanz, Zinkblende, Kupferkies, Pyrit, Schwerspath, Apatit, Kalk- und Bitterspath" (DUNKER 1884). Hinsichtlich ihrer Bildung werden sie in variskische und postvariskische Vorkommen unterschieden.

Durch den Erzabbau und die damit verbundene Massenverlagerung hat der Mensch massiv in geodynamische Vorgänge eingegriffen und Verwitterungs-, Erosions- und Sedimentationspro-

zesse beschleunigt (WIEBER 1994). Durch das Fördern der Erze wurden mehrere geologische Barrieren überwunden und ein komplexes hydrogeologisches Regime geschaffen, das sich deutlich von den ursprünglichen Verhältnissen unterscheidet. Während unter natürlichen Verhältnissen die im Hunsrück verbreiteten devonischen Sedimentgesteine überwiegend nur eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit und ein geringes Speichervermögen aufweisen, wurden durch den Bergbau mit seinen Bergwerksanlagen sowie Abbaubereichen ergiebige Grundwasser-/Grubenwasserreservoirs mit z.T. hohen Fließgeschwindigkeiten geschaffen (WIEBER 1999). Nach Einstellung des Bergbaus und der Wasserhaltung stieg das Grundwasser meist bis auf das Niveau des Tiefen Stollens an und entwässert von dort in freiem Gefälle in den benachbarten Vorfluter.

Gegenüber den natürlichen oberflächennahen Grundwässern können sich die Grubenwässer infolge der Oxidation sulfidischer Erze oder durch Aufstieg hoch mineralisierter Grundwässer deutlich unterscheiden und bei Einleitung insbesondere in kleine Vorfluter negativen Einfluss auf die chemische und biologische Gewässergüte hervorrufen.

In den letzten Jahren wurden im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten des Bearbeiters sowie von Studenten der Universitäten Koblenz/Landau und Mainz (WESSOLOWSKI 2006; REICHERT 2007; LEICHSENRING 2019; u.a.m.) Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen nachfolgend vorgestellt und zusammenfassend ausgewertet werden.

## 2. Bergbau im Hunsrück (Rheinisches Schiefergebirge)

Der Eisen- und Nichteisenerzbergbau im Rheinischen Schiefergebirge kann auf eine lange Tradition zurückblicken. Keltischer und römischer Bergbau sind nachgewiesen. Zusammenfassende Literatur zu Art und Umfang des Bergbaus befinden sich in DUNKER (1884), HERBST & MÜLLER (1966) sowie ROSENBERGER (1971). Die NE-Erz-Vorkommen des Hunsrücks sind an tektonisch vorgegebene, variskisch streichende Strukturen innerhalb des ca. 2.000 m mächtigen Hunsrück-schiefers gebunden. Sie wurden hydrothermal gebildet. Wirtschaftlich bedeutend waren vor allem Bleiglanz (PbS) und Zinkblende (ZnS).

HERBST & MÜLLER (1966) fassen die NE-Erz-Vorkommen zu drei Gangzügen zusammen (Abb. 1):

- Werlauer Gangzug mit einem Verlauf von Wellmich über Werlau, Pfalzfeld bis Alterkühl mit den Feldern Gute Hoffnung Camilla und Eidgrube,
- Telliger Gangzug vom Altlayer Bachtal bis Sevenich mit einer Länge von ca. 20 km mit den Konzessionen Vereinigte Theodor, Friedrichsfeld, Gut Glück, Scheideglück, Apollo, Diana, Mörs und Friedrichsglück,
- Altlayer Gangzug, er beginnt südöstlich von Tellig und setzt sich bis Minheim an der Mosel fort. Auf ihm befinden sich die Felder Adolf Helene, Hohenstein, Marienburg, Julie, Trarbach, Bernkastel und Karl Theodor.

Die weiteren NE-Erzvorkommen des Hunsrücks besaßen nur eine untergeordnete Bedeutung. Vererzungsschwerpunkte mit größerer wirtschaftlicher Bedeutung befanden sich nach HERBST & MÜLLER (1966) bei:

- Werlau auf beiden Seiten des Rheins,
- Tellig und Altlay,
- Gondenau.

Die Bergwerke sind nun seit über 50 Jahren stillgelegt und geflutet. Die Hochbausohlen führen Wasser der ungesättigten Zone ab. Die Entwässerung der gesättigten Zone erfolgt i.d.R. über die Tiefen Stollen/Entwässerungsstollen, wobei diese anteilig auch Sickerwasser aufweisen (können).

### 3. Untersuchungsprogramm

Zunächst wurden Literaturlauswertungen zum NE-Erzbergbau im Hunsrückgebiet durchgeführt (WIEBER 1994; WESSOLOWSKI 2006). Die ermittelten Gruben wurden kartiert und Grubenwasseraustritte erfasst und beprobt (WESSOLOWSKI 2006). Ergänzend untersuchte LEICHSENRING (2019) einige Grubenwasseraustritte. Eine Besonderheit stellt die Grube Kautenbach dar, die im Rahmen weiterer Untersuchungen seit 2013 jährlich beprobt wird (geochemische Praktika von Studenten der Universität Mainz).

Die Probenahmen erfolgten unter Messung der vor-Ort Parameter sowie der Schüttung. Die chemische Analytik fand im hydrogeochemischen Labor der Universität Mainz statt.

Die im Rahmen dieser Arbeit erfassten und untersuchten Gruben/-wasseraustritte sind in Abb. 1 dargestellt. Dabei ist auch differenziert, ob Wasseraustritte festgestellt wurden.

WESSOLOWSKI (2006) hat 33 Gruben/Stollen erfasst, bei denen kein Grubenwasser nachgewiesen wurde. Bei elf Gruben war Grubenwasser ohne erkennbaren oberirdischen Abfluss eingestaut, von denen fünf beprobt wurden. Wasseraustritte am Stollenmundloch konnten bei 21 Stollen bzw. Gruben erfasst werden. Leichsenring (2019) hat an drei weiteren wasserführenden Bergwerksstollen Grubenwasserproben entnommen und analysiert.

Die Grube Kautenbach mit drei wasserführenden Stollen wurde vom Jahr 2013 an jährlich im Rahmen von Studentenpraktika der Johannes Gutenberg-Universität Mainz beprobt.

Insgesamt umfassen die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen 32 wasserführende Stollen von 28 NE-Erzbergwerken im Hunsrück.

### 4. Bergwerkshydrogeologie

Die hydrothermal gebildeten sulfidischen Buntmetallerzgänge des Hunsrücks fallen in der Regel steil ein. Der Ausbiss der Erzgänge lässt sich z.T. über Tage durch Pingenfelder nachverfolgen, da die Erze zunächst im Tagebau gewonnen wurden. Mit zunehmender Teufe musste jedoch zum untertägigen Abbau übergegangen werden. In den stark zertalten deutschen Mittelgebirgen wurde häufig auf Vorfluterniveau ein Entwässerungsstollen (auch Tiefer Stollen oder bei der Entwässerung mehrerer Bergwerke Erbstollen) angelegt, um das darüber liegende Gebirge möglichst weitgehend zu entwässern. Bei Abbau unterhalb des Entwässerungsstollenniveaus wurde es erforderlich, das zuströmende Grundwasser zu heben (Wasserhaltung). Die maximale Abbautiefe erreichte im Hunsrückrevier die Verbundgrube Gute Hoffnung mit 893,4 m unter Geländeoberkante (Tab. 1), die beidseitig des Rheins Abbau betrieb. Unter dem Rhein waren die beiden Bergwerksteile durch die sogenannte Rheinstrecke – entsprechend der 180 m-Tiefbausohle – verbunden.

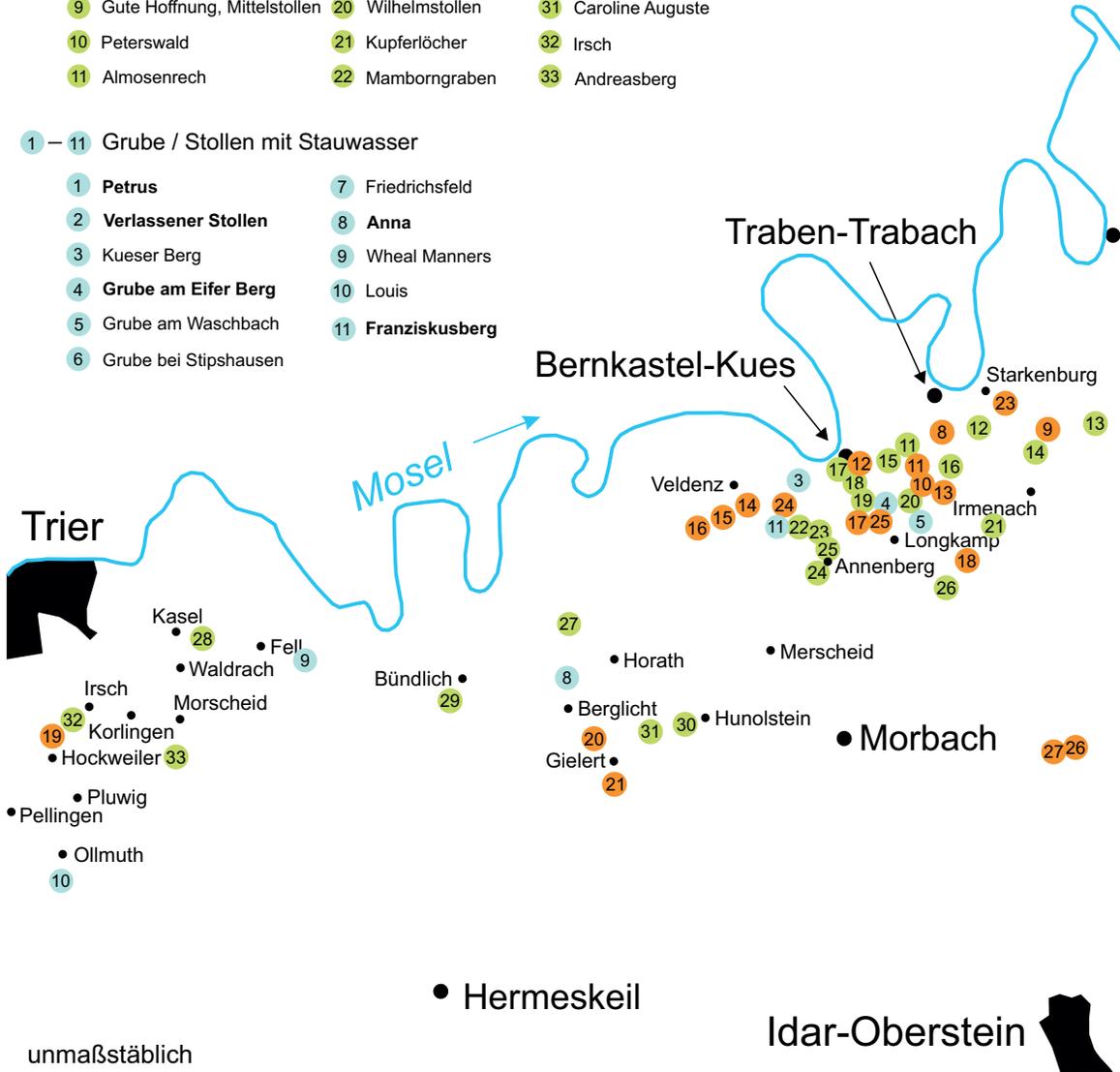
Abb. 1: Nichteisenerzvorkommen des Hunsrückreviers (Auswahl, untersuchte Stollen **fett** hervorgehoben).

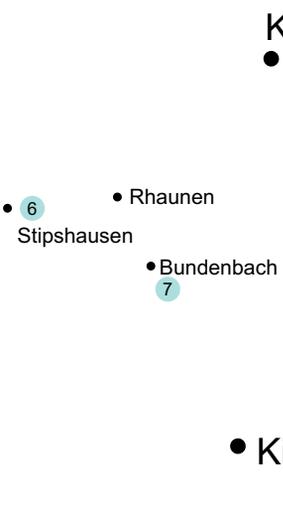
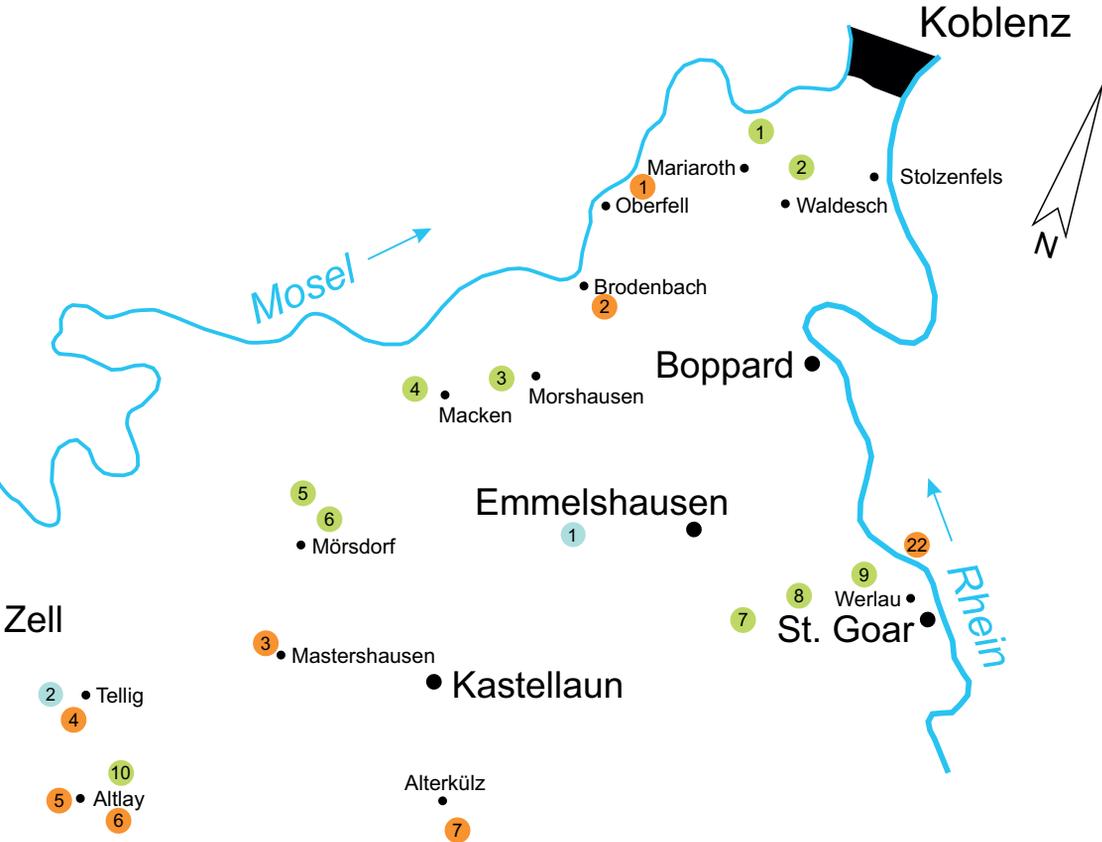
1 – 33 Grube / Stollen ohne Grundwasser

- |                                |                   |                      |
|--------------------------------|-------------------|----------------------|
| 1 Grube bei Mariaroth          | 12 Kampstein      | 23 Katzenpfad        |
| 2 Grube bei Waldesch           | 13 Marienberg     | 24 Alter Annenberg   |
| 3 Theresia                     | 14 Susanna        | 25 Kleiner Annenberg |
| 4 Hofnungstern                 | 15 Bleistolln     | 26 Petersstollen     |
| 5 Grube bei Lieg               | 16 Ofen           | 27 Glücksanfang      |
| 6 Neuweißweiler                | 17 Helena         | 28 Helene Therese    |
| 7 Camilla                      | 18 Barbara        | 29 Marienswohl       |
| 8 Gründelbachstollen           | 19 Windschnur     | 30 Hunolstein        |
| 9 Gute Hoffnung, Mittelstollen | 20 Wilhelmstollen | 31 Caroline Auguste  |
| 10 Peterswald                  | 21 Kupferlöcher   | 32 Irsch             |
| 11 Almosenrech                 | 22 Mamborngraben  | 33 Andreasberg       |

1 – 11 Grube / Stollen mit Stauwasser

- |                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| 1 <b>Petrus</b>              | 7 Friedrichsfeld         |
| 2 <b>Verlassener Stollen</b> | 8 <b>Anna</b>            |
| 3 Kueser Berg                | 9 Wheal Manners          |
| 4 <b>Grube am Eifer Berg</b> | 10 Louis                 |
| 5 Grube am Waschbach         | 11 <b>Franziskusberg</b> |
| 6 Grube bei Stipshausen      |                          |





1 – 27 Grube / Stollen mit Grubenwasser

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1 Goldlay                                | 15 Hugostollen                    |
| 2 Mosella                                | 16 Birgelsgraben                  |
| 3 Apollo                                 | 17 Ulisegen                       |
| 4 Theodor, Robert Bosch-Stollen          | 18 Libussa                        |
| 5 Hunsrück                               | 19 Bischofsheim                   |
| 6 Adolf-Helene                           | 20 Gertrudssegen I                |
| 7 Eid                                    | 21 Gertrudssegen II               |
| 8 Leerbrunnen                            | 22 Gute Hoffnung, Ehrenthaler St. |
| 9 Kirschwalder Werk                      | 23 Gondenau                       |
| 10 Kautenbach, Clara- und Tiefer Stollen | 24 Michaelisstollen               |
| 11 Kautenbach, Eleonore-Stollen          | 25 Wasserschlösschen              |
| 12 Helena und Barbara, Antonstollen      | 26 Marienstollen 1                |
| 13 Dorotheenberg                         | 27 Marienstollen 2                |
| 14 Veldenz, Tiefer Stollen               |                                   |

Tab. 1: Abbauteufe von Bergwerksschächten im Hunsrück (Auswahl, Datengrundlage HERBST & MÜLLER 1966)

Bergwerk	Name des Schachtes	Ansatzpunkt (m NN)	Endteufe (m NN)	Tiefe des Bergwerks
Gondenau	Schacht	+358,7	+202,1 ca. +140	156,6 m 220 m
		3. Tiefbausohle 5. Tiefbausohle		
	Gesamtteufe			ca. 220 m
Adolf Helene	Hauptschacht	+256,6	+52,3	204,4 m
	Förderschacht	+276,4	+219,2	57,2 m
	Franzschacht	+259,4	+220,6	38,8 m
	Gesamtteufe			222,1 m
Theodor	Förderschacht	+426,9	+289,5	137,4 m
	Blindschacht	+289,4	+173,0	116,4 m
	Schacht Zell	+432	+411	21 m
	Gesamtteufe			259 m
Apollo	Schacht	+368,9	+324,0 ca. 284	44,9 m ca. 85 m
	Tiefer Stollen 40m	324,0		
	TBS	keine Angabe		
	Gesamtteufe			ca. 85 m
Camilla	Camilla Schacht	+501,4	+291,5	209,9 m
Gründelbach	Frankscheider Schacht	+439	+248,4	190,6 m
Gute Hoffnung	Gustavschacht	+267,9	-165,0	
	Werlauer Schacht	+310,1	-195	
	Mittelschacht	+101,7	-583,3	
	Christianschacht	+97,9	-504	
	Friedrichschacht	+285	-455	
	Gesamtteufe			

Mit der Einstellung des Bergbaus wurde auch die Wasserhaltung aufgegeben und die Gruben stauten sich im Laufe der Zeit durch zufließende Grund- und Sickerwässer ein. Der Grundwasserspiegel stellte sich dabei meist auf Erbstollen- bzw. Entwässerungstollenniveau ein, da die Wasserlösungsstollen weiterhin die Grubenbaue entwässern. Gegenüber der ursprünglichen hydrogeologischen Situation vor Beginn der bergbaulichen Tätigkeit ist der Grundwasserspiegel z.T. bis über 100 m abgesenkt (WIEBER 1999).

Das gesamte Bergwerk stellt vereinfacht eine überdimensionale Drainage mit dem Tiefen Stollen als Auslauf dar. Durch das Anschneiden von Tiefenpotentiallinien und gleichzeitiger Druckentlastung infolge des resultierenden Absenkungstrichters kommt es zum Aufstieg von Tiefengrundwässern, die sich hinsichtlich ihrer physiko-chemischen Eigenschaften erheblich von den „oberflächennahen“ Grund- und Grubenwässern unterscheiden.

Zur Abschätzung der Reichweite des Absenkungstrichters kann die durch Feldversuche des Corps of Engineers der U.S. Army (in HERTH & ARMDTS) modifizierte Formel von SICHARD (1928) herangezogen werden. Danach liegt die Reichweite (R) zwischen:

$$R \text{ (m)} = 1500 * \text{Absenkung (m)} * \sqrt{kf \text{ (m/s)}}$$

und

$$R \text{ (m)} = 2000 * \text{Absenkung (m)} * \sqrt{kf \text{ (m/s)}}$$

Diese Formel gilt für Porengrundwasserleiter, die als homogen angesehen werden. In dem untersuchten devonischen Kluftgrundwasserleiter herrscht jedoch ein anisotropes Trennflächengefüge vor. Entscheidend für die Fließvorgänge ist die Öffnungsweite und Erstreckung der Trennflächen. In den gefalteten schiefrigen Siltsteinen mit zwischengelagerten (quarzitischen) Sandsteinen des Bearbeitungsgebietes besteht zwar ein engständiges Trennflächengefüge, die Öffnungsweite ist jedoch in weiten Teilen so gering, dass eine Wasserzirkulation kaum stattfinden kann. Daher liefert die nach dieser Formel berechnete Reichweite allenfalls erste Anhaltspunkte. Erfahrungsgemäß beschränken sich im devonischen Gebirge des Hunsrücks Bereiche mit stärkerer Grundwasserführung auf eng begrenzte Zonen (z. B. Zerrungstektonik, Quarzgänge). In den Bergwerken sind lokal größere Öffnungsweiten der Trennflächen durch den Sprengvortrieb beim Auffahren des Stollens entstanden. Sie setzen sich aber nicht tief in das Gebirge fort.

Die hydrogeologischen Verhältnisse ehemaliger untertägiger Bergwerksanlagen sind in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die Unterscheidung der Wässer erfolgt auf Grundlage hydrogeologischer Kriterien und der Lage der Grubenwasserzutritte (WIEBER 1999).

Gesättigte Zone:

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

Ungesättigte Zone:

- Sickerwässer aus Abbaubereichen
- Sickerwasser außerhalb von Abbaubereichen
- Wasserzutritte aus Schächten oder Rollen der ungesättigten Zone

Durch die Flutung der Bergwerke entstanden anthropogen geschaffene Grundwasserleiter, die innerhalb der Gesteinsformation „Hunsrückschiefer“ ergiebige Grundwasserreservoirs schufen. Die Stollen und Schächte durchziehen den hydrogeologisch überwiegend als Geringleiter ausgebildeten Hunsrückschiefer.

Für die Strömungsvorgänge im gesättigten Bereich gefluteter Gruben ist nach WOLKERSDORFER (2008) die Darcy-Strömung nur von untergeordneter Bedeutung. Laminare Strömung nach DARCY tritt im Wesentlichen in den rückverfüllten Abbaubereichen auf. Die Strömung nach DARCY ist definiert als laminare Strömung für viskose Fluide durch isotrope poröse Medien (HÖLTING & COLDEWEY 2009). Nicht-lineare oder turbulente Strömungen können nicht mehr nach DARCY beschrieben werden.

In offenen Hohlräumen gefluteter Gruben (Schächte, Sohlen) können nach WOLKERSDORFER (2008) im Wesentlichen drei Arten von Strömung oder auch Kombinationen dieser drei Arten auftreten:

- laminare oder turbulente Poiseuille-Strömung
- laminare oder turbulente Konvektion
- freie oder erzwungene Strömung

Weitere Arten der auftretenden Strömungen können freie und erzwungene Strömungen sein. Freie Strömung entwickelt sich, wenn Dichteunterschiede der Fluide die einzige antreibende Kraft darstellen, gezwungene Strömung tritt auf, wenn externe Kräfte das Strömungsverhalten antreiben (WOLKERSDORFER 2008).

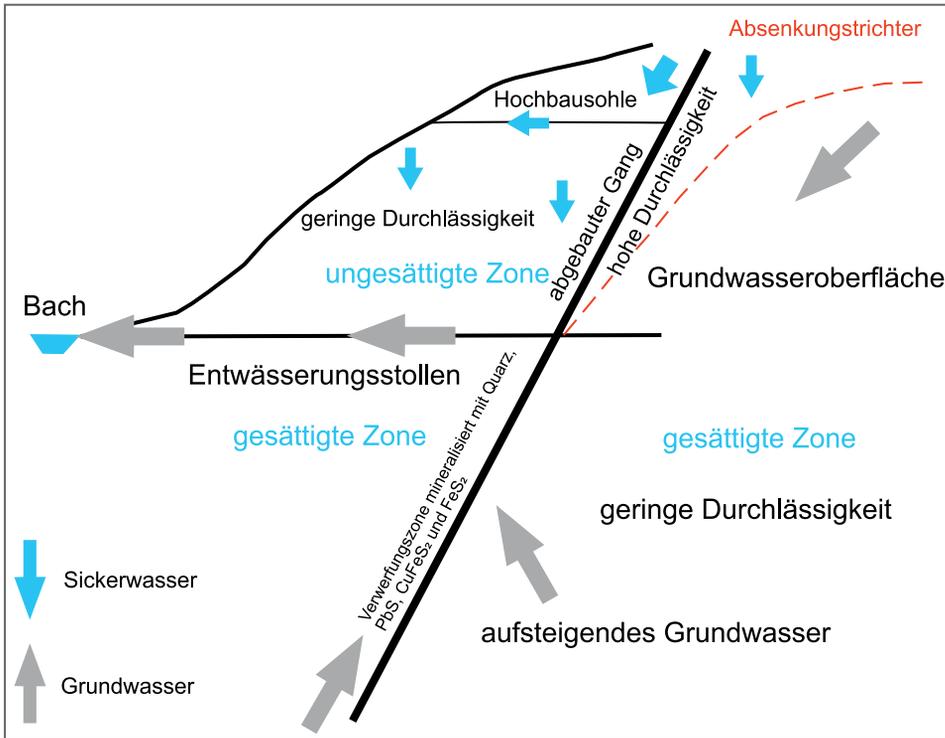


Abb. 2: Schematisches hydrogeologisches Profil gefluteter Erzgruben im Rheinischen Schiefergebirge (verändert nach WIEBER 2014)

In gefluteten Gruben können alle Arten von Strömungen nebeneinander auftreten. Das Strömungsverhalten kann sich auf kurzen Abschnitten und in kurzen Zeiträumen ändern (WOLKERSDORFER 2008).

Um das Strömungsverhalten gefluteter Hohlräume zu beschreiben, wird die Navier-Stokes-Differentialgleichung für inkompressible Fluide verwendet. Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgt über hydraulische Modelle. Die gefluteten Schächte und Sohlen repräsentieren dabei Strömung auf vorgegebenen Fließpfaden, während sich die Strömung in der Gesteinsmatrix als eine Kombination von Kluft- und Poren-Strömung beschreiben lässt (WOLKERSDORFER 2008). Die Kluftbereiche sind lediglich für die chemische Zusammensetzung des Grubenwassers von Bedeutung, sie haben hingegen für das Strömungsverhalten der gefluteten Hohlräume nur eine untergeordnete Bedeutung (WOLKERSDORFER 2008). Grundsätzlich stellen über Sohlen verbundene Schächte ein System kommunizierender Röhren dar und weisen einen annähernd gleichen Wasserstand auf. Lediglich bei Dichteunterschieden zwischen den Wässern in den Schächten können größere Unterschiede auftreten (WOLKERSDORFER 2008). Turbulente Strömungsbedingungen innerhalb einer gefluteten Grube zeigen sich daran, dass tiefenaufgelöste Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen konstante Temperaturen und Leitfähigkeiten über die Tiefe liefern

und das ebenso nahezu die gleiche physikochemische Beschaffenheit der Wässer mit der Tiefe anzutreffen ist (WOLKERSDORFER 2008). Nach WOLKERSDORFER (2008) ist die Strömung in gefluteten Hohlräumen nahezu immer als turbulent anzusehen.

Die beschriebenen Prozesse beziehen sich im Wesentlichen auf die wassergesättigte Zone. Der Auslauf des Grubenwassers nach Übertage markiert jedoch die Grenze von ungesättigter zu gesättigter Zone und stellt eine überdimensionale Drainage dar. Die darüber befindlichen geologischen Schichten und Bergwerkssohlen sind also nicht oder nicht vollständig wassergesättigt. Unterhalb des in freiem Gefälle austretenden Grubenwasser wird zwar eine mehr oder weniger vollständige Wassersättigung aller Hohlräume angenommen, ob und wie weit dies aber gerade im Hinblick auf den das Bergwerk umgebenden Grundwasseraquifer ebenfalls gilt, ist nicht eindeutig zu sagen. Für ungesättigte Bereiche gelten weitere Gesetzmäßigkeiten.

Nachfolgend werden die bedeutenderen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bergwerksanlagen des Hunsrücks beschrieben:

- Grube Gute Hoffnung bei Werlau,
- Grube Helena und Barbara mit dem Antonstollen bei Bernkastel,
- Grube Kautenbach bei Bad Wildstein,
- Grube Adolf Helene bei Altlay,
- Grube Theodor bei Tellig mit dem Robert Bosch-Stollen.

### **Grube Gute Hoffnung**

Sie stellte das bedeutendste Erzbergwerk im Hunsrück dar. Die konsolidierte Grube baute beidseitig des Rheins (Taunus und Hunsrück) von NE nach SW fünf Mittel (HERBST & MÜLLER 1966):

- Wellmicher Mittel mit einer Gangfläche von 165.000 m<sup>2</sup> und einer Teufe bis -455 m NN,
- Ehrenthaler Mittel mit einer Gangfläche von 30.000 m<sup>2</sup> und einer Teufe bis -174,3 m NN,
- Christianschachter Mittel mit einer Gangfläche von 89.000 m<sup>2</sup> und einer Teufe bis -504 m NN,
- Mittelschachter Mittel mit einer Gangfläche von 386.000 m<sup>2</sup> und einer Teufe bis -583,8 m NN,
- Gustavschachter Mittel mit einer Gangfläche von 168.000 m<sup>2</sup> und einer Teufe bis -165 m NN.

Die Wellmicher und Ehrenthaler Mittel befinden sich östlich des Rheins im Taunus. Die drei anderen Mittel liegen auf der linken Rheinseite. Die einzelnen Erzvorkommen sind durch eigene (Blind-) Schächte und Stollen erschlossen. Die wichtigsten Stollen sind der August- und der Ehrenthaler Stollen (rechte Rheinseite) sowie der Friedrich-Wilhelm-Stollen (Länge 5970 m), der Wolfsbacher Stollen (Länge 980 m) sowie der Mittelstollen (linke Rheinseite). Verbunden sind die Vorkommen durch die sogenannte Rheinstrecke (Abb. 3), die ca. 130 m unterhalb der Rheinsohle mit einer Länge von ca. 3.850 m vorgetrieben wurde. Nach HERBST & MÜLLER (1966) kam es zu keinen bedeutenden Wasserzutritten aus dem Vorfluter, da die verbreiteten Hunsrückschiefer nur eine geringe Gesteinsdurchlässigkeit aufweisen und auch über geologische Störungen und andere Trennflächen keine nennenswerten Wasserzuflüsse beobachtet wurden. Am Ende des zweiten Weltkriegs wurde die Tiefbausohle gesprengt, um ein Vorrücken der Alliierten unter dem Rhein zu verhindern. Hydrogeologisch stellt diese Tiefbausohle jedoch weiterhin eine (gut) durchlässige Verbindung zwischen den Grubenbauen beidseitig des Rheins dar (HERBST & MÜLLER 1966).

Nach Einstellung des Bergbaus wurde auch die Wasserhaltung nicht weiter betrieben. Der Grund- bzw. Grubenwasserspiegel stieg auf das Niveau des Ehrenthaler Grundstollens an und entwässert von dort sichtbar in den Rhein, da auch die linksrheinischen Grubenbaue weiterhin

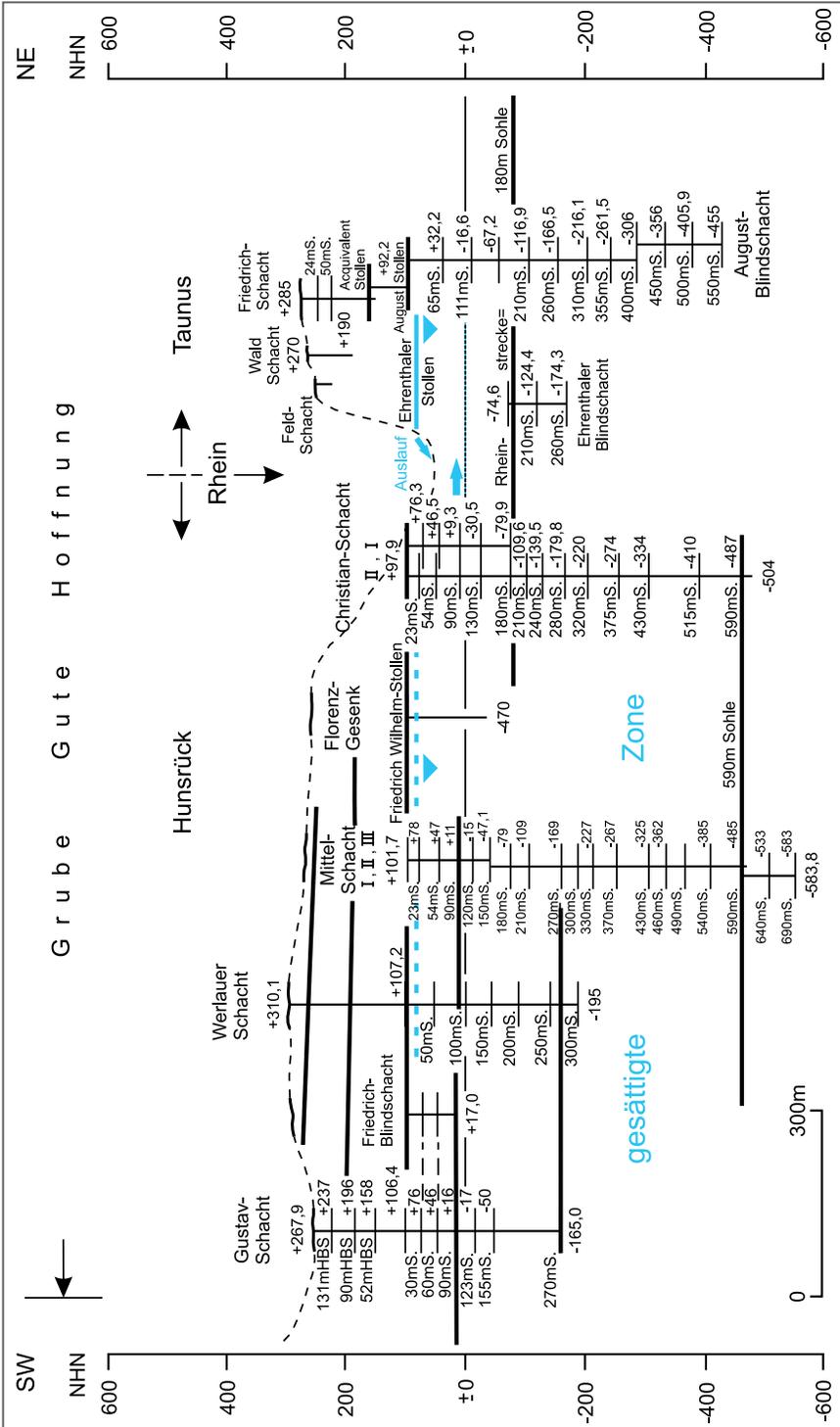


Abb. 3: Hydrogeologisches Modell der Grube Gute Hoffnung bei Werlau (ergänzt auf Grundlage von HERBST & MÜLLER 1966).

über die Rheinstrecke zum Grundstollen entwässern (Abb. 3). Auf der linken Rheinseite befinden sich keine Entwässerungsstollen der gesättigten Zone, bei denen Grubenwasser austritt. Anders verhält es sich mit Entwässerungsstollen der ungesättigten Zone (z.B. Mittelstollen), über die sichtbar gering mineralisierte Wässer austreten.

Die gefluteten Tiefbausohlen und Schächte haben anthropogen ein bedeutendes Wasserreservoir geschaffen. Insgesamt hat der Bergbau ein System von 20.965 m Stollen, 27.861 m Strecken und Querschläge sowie 3.642 m Schächte aufgefahren (HERBST & MÜLLER 1966). Die hydrogeologische Situation ist modellhaft in Abb. 3 dargestellt.

Tab. 2: Wasserhaltung/Abfluss der Grube Gute Hoffnung bei Werlau während der Betriebsphase sowie bei unterschiedlichen Flutungshöhen (HERBST & MÜLLER 1966; WIEBER, 2006; RUSMAN 2011)

	Wasserhaltung/Abfluss		Wasserstand (m. NN)
Linksrheinische Grubenbaue	2.800 m <sup>3</sup> /d	32,4 l/s	bis -583 m NN
Rechtsrheinische Grubenbaue	1.800 m <sup>3</sup> /d	20,8 l/s	bis -455 m NN
Grubenbaue nach Flutung auf oberhalb Rheinstreckenniveau (180 m Tiefbausohle)	2.000 m <sup>3</sup> /d	23,1 l/s	ca. -80 m NN
Schüttung nach Flutung auf Ehrenthaler Grundstollenniveau	1.000 m <sup>3</sup> /d	11,6 l/s	ca. +80 m NN
WIEBER (2006)		6,6 l/s	ca. +80 m NN
RUSMAN (2011)		6,5 – 6,8 l/s	ca. +80 m NN

Bei einem Wasseranstieg von ca. -520 m NN auf -80 m NN verringert sich die Förderung um ca. 30 l/s, entsprechend 6,8 l/100 m. Ein weiterer Anstieg auf das aktuelle Niveau von +80 m NN führt zu einer weiteren Reduzierung um 11,5 l/s, entsprechend ca. 7,2 l/100 m. Die jüngeren Messungen von WIEBER (2006) und RUSMAN (2011) zeigen einen weiteren Rückgang..

### Grube Helena und Barbara

Die Grube wurde auch als „Grube Tiefenbach“ bezeichnet und stellte das bedeutendste Bergwerk im Gebiet Bernkastel dar. Abgebaut wurde ein Quarzgang mit Bleiglanz, Kupferkies und Fahlerz. Das Bergwerk entwässert über den Antonstollen (Abb. 4). Tiefbau unterhalb des Antonstollenniveaus ging nur in geringem Umfang um. Des Weiteren wurde das Bergwerk durch die Tagesstrecke Helena und den Barbara-Stollen erschlossen. Diese befinden sich oberhalb des Antonstollenniveaus und sind verschüttet. Sie weisen keinen erkennbaren Wasseraustritt auf. Der Antonstollen wurde von 1974 bis 2003 für Rohwasser zur Trinkwassergewinnung von der Verbandsgemeinde genutzt (Wessołowski 2006). Vor dem Stollenmundloch wurde ein Fassungsgebäude errichtet und betrieben. Die Entnahmemenge umfasste im Durchschnitt 400 m<sup>3</sup>/d. Die maximale Entnahme war mit 600 m<sup>3</sup>/d genehmigt.

Nach Einstellung der Nutzung wurde der Antonstollen wasserdruckhaltend verschlossen und es staute sich eine Wassersäule von ca. 22 m ein. Die Einstellung der Grubenwassernutzung erfolgte wegen erhöhter Antimonergehalte (Wessołowski 2006).

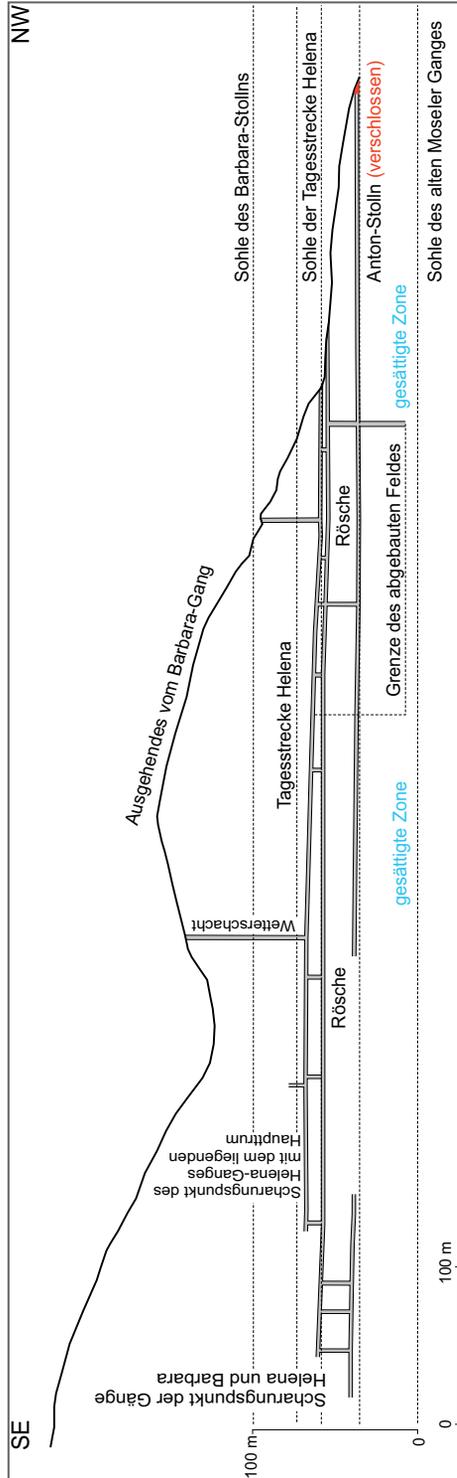


Abb. 4: Schematischer Saigerriss der Grube Helena und Barbara (Tiefenbach; nach Risswerk Archiv LGB).

### Grube Kautenbach

Die Grube befindet sich bei Bad Wildstein. Im Grubenfeld waren postvariskisch gebildete Blei-, Kupfer- und Pyritzerze bauwürdig. Die anstehenden Festgesteine bestehen aus geschieferten unterdevonischen sandigen Tonsteinen der Unteremsstufe. Erschlossen wurde die Lagerstätte durch eine Hochbausohle (Clara-Stollen, rote Quelle) sowie zwei Tiefe Stollen (Abb. 5). Im Jahr 1820 wurden beim Bergbau mehrere warme Quellen angetroffen. Daher wurde ein zweiter Tiefer Stollen (Eleonoren-Stollen) etwa 200 m talabwärts aufgefahren. Er diente zur Ableitung des Thermalwassers, welches in der Folge zu Bade- und Heilzwecken genutzt und vermarktet wurde. Das Thermalwasser besitzt gemäß Bäderbuch Rheinland-Pfalz (1972) eine Temperatur von 33,3°. HEVL (1972) schließt auf eine Herkunft der Wässer aus ca. 800 m Tiefe.

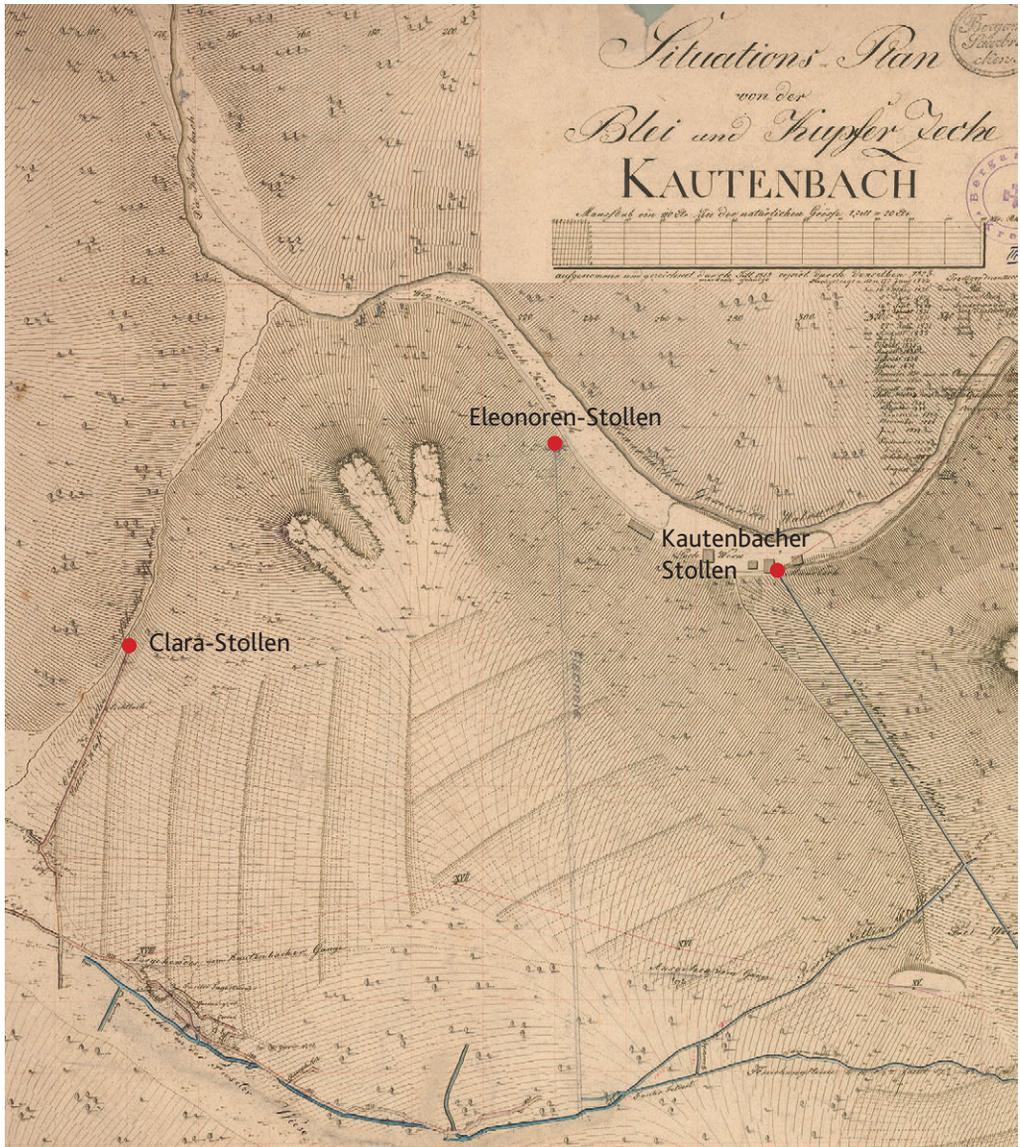


Abb. 5: Grundriss (Ausschnitt) der Grube Kautenbach (Riss-Archiv LGB).

Unterhalb der Tiefen Stollen wurde kein Tiefbau betrieben. Zur Einstellung des Abbaus kam es im Jahre 1880 (WIEBER 2003). Die beiden Tiefen Stollen entwässern weiterhin das Grubengebäude.

### Grube Adolf Helene

Die Grube befindet sich bei Altlay im Landkreis Cochem-Zell. Erschlossen wurden die Erzvorkommen (Blei-, Zink- und Kupfererze) durch mehrere Stollen:

- Emilienstollen (+297,3 m NN),
- Tiefer Emilienstollen (+246 m NN),
- Fichtenstollen (+258,8 m NN),
- Tal-Stollen (+259,8 m NN) u.a.

Die tiefer anstehenden Erze wurden durch Schächte aufgeschlossen. Der Tiefe Emilien-Stollen stellt heute die Entwässerung der gesamten Grube dar, da die drei Schächte („Förderschacht“, „Franzschacht“ und „Hauptschacht“) des Bergwerks nach Auswertung des Risswerks im Gegensatz zu den Angaben bei HERBST & MÜLLER (1966) über die zweite Tiefbausohle miteinander verbunden und die Tiefbausohlen (TBS) 2 bis 9 an den Hauptschacht angeschlossen sind. Den durchschnittlichen Wasserzufluss während der Betriebsphase haben HERBST & MÜLLER (1966) mit 1.000 m<sup>3</sup>/d entsprechend 11,6 l/s ermittelt.

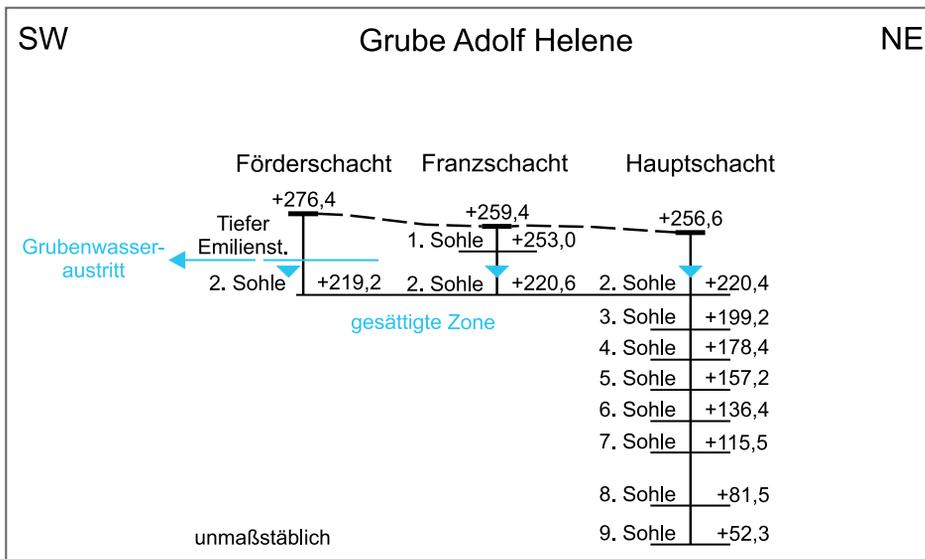


Abb. 6: Hydrogeologisches Modell der Grube Adolf Helene (ergänzt basierend auf HERBST & MÜLLER 1966).

### Grube Theodor

Diese Grube liegt bei Tellig im Landkreis Cochem-Zell. In der Lagerstätte wurden Bleiglanz (PbS), Zinkblende (ZnS) sowie Kupferkies (CuFeS<sub>2</sub>) abgebaut. Gangart ist Quarz. Das Bergwerk (Abb. 7) verfügte über einen Tagesschacht zur Förderung (Theodor), einen Blindschacht und 9 Tiefbausohlen (TBS). Die 5. TBS trägt die Bezeichnung Robert Bosch-Stollen und wurde im Jahre 1944 bis in den Hang des Peterswalder Bachtals vorgetrieben. Der Stollen diente zur Bewetterung und zur Ableitung des Grubenwassers aus der Wasserhaltung. Nach Einstellung des Bergbaus ist das Mundloch verbrochen. Der Stollen fungiert aber weiterhin als Entwässerungsstollen (Abb. 7)

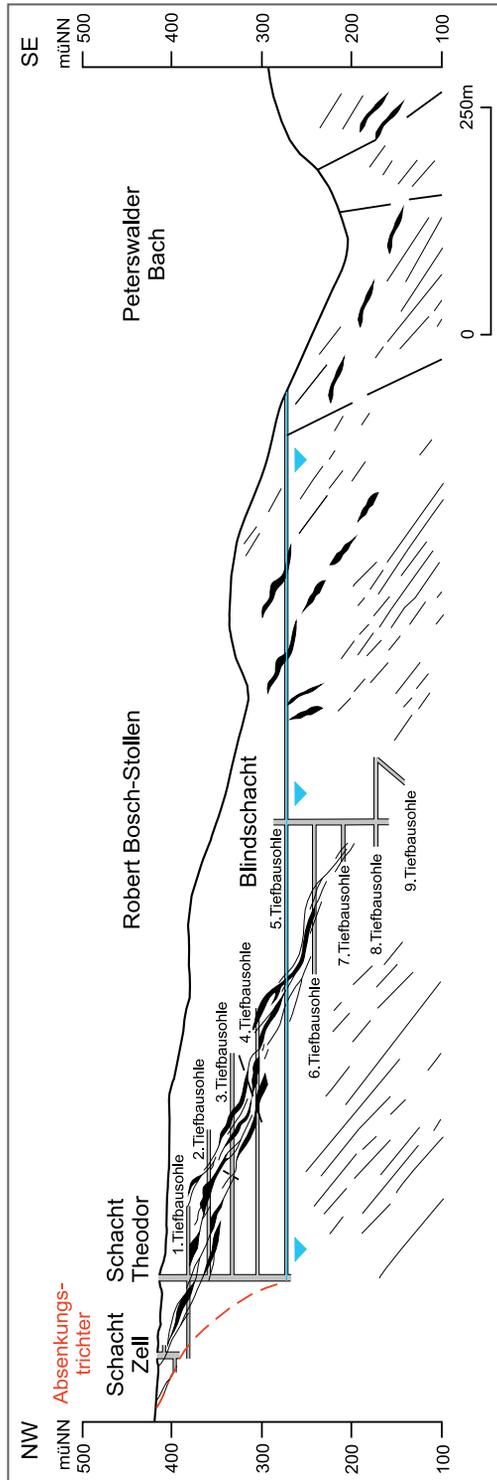


Abb. 7: Hydrogeologisches Modell der Grube Theodor (ergänzt basierend auf HERBST & MÜLLER 1966)

## 5. Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend (Tab. 3) erfolgt eine Kurzcharakterisierung der erfassten und beprobten wasserführenden Stollen (WIEBER, 1994; WESSOLOWSKI, 2006; REICHERT, 2007; RUSMAN, 2011; LEICHSENRING, 2019). Daneben sind eine Vielzahl weiterer Gruben/Stollen bekannt, die im Gelände nicht vorgefunden wurden oder die keine Wasseraustritte aufwiesen (WESSOLOWSKI, 2006).

Tab. 3: Kurzbeschreibung der Bergwerksanlagen/Stollen mit Wasseraustritten (Auswahl).

Bergwerk/Grube	Bergwerksanlagen	Beschreibung	Schüttung (l/s)	Vorfluter
Grube Bischofshelm (Hockweiler)	Tiefer Stollen mit 5 Sohlen	Wasseraustritt am Stollenmund	0,3 – 0,35	Franzenheimer Bach
Gertrudssegen I bei Gielert	3 Hochbausohlen (HS)	Wasseraustritt aus TS	0,2 – 0,03	Gielserter Bach
Gertrudssegen II bei Gielert	1 Stollen	Wasser eingestaut, Überlauf zum Vorfluter	0,1 – 0,15	Liedchenbach
Helena und Barbara bei Bernkastel	Antonstollen	ehemalige Trinkwasserversorgung (aktuell 20-25 m Einstau)	5 – 11	Tiefenbach
Birgelsgraben bei Monzelfeld	Offener Stollen	Wasser eingestaut, Überlauf zum Vorfluter	0,2	Hinterbach
Kautenbach bei Bad Wildstein	Tiefer Stollen (TS) Eleonoren-Stollen Clara-Stollen (HS)	Thermalwasserquelle beim Bergbau angeschnitten	6,0 – 6,4 3,0 <1,0	Kautenbach
Dorotheenberg bei Kautenbach	1 Stollen	Wasseraustritt an verschüttetem Mundloch	0,01 – 0,03	Versickerung
Leerbunnen bei Bernkastel	1 Stollen	Wasseraustritt an verschüttetem Mundloch	0,25 – 0,35	Kautenbach
Gondenau bei Starkenburg	Tiefer Stollen mit 1 HS und 5 TBS	Wasser versickert in Halde	0,01 – 0,03	Ahringsbach
Kirschwalder Werk bei Starkenburg	1 Stollen	Wasser eingestaut, Überlauf zum Vorfluter	0,02	Lommersbach
Libussa bei Emmeroth	1 Stollen	Wasseraustritt aus Rohr, Überlauf zum Vorfluter	0,2	Kautenbach
Hunsrück bei Altlay	1 Stollen	Wasseraustritt aus Rohr, Überlauf zum Vorfluter	0,05	Hitzelbach
Theodor bei Tellig	Robert Bosch-Stollen (TS)	Schachtbetrieb mit 9 TBS, 5. TBS wurde zum TS ausgebaut	3,0	Peterswalder Bach
Apollo bei Mastershausen	1 Schacht, 1 Hochbausohle, 1 Tiefer Stollen, 2 Tiefbausohlen	Wasseraustritt am Tiefen Stollen (TS)	0,1	Sosberger Bach
Mosella bei Brodenbach	1 Stollen	Wasser eingestaut, Überlauf zum Vorfluter	0,4	Brodenbach
Goldlay bei Oberfell	1 Stollen	freier Auslauf, über Rohr zum Vorfluter	1,0	Mosel
Hugostollen bei Veldenz	1 Stollen	freier Auslauf	0,35 – 1,0	Veldenzter Bach
Tiefer Stollen bei Veldenz	1 Stollen (Wasserversorgung)	Ableitung über Verrohrung	0,13	Veldenzter Bach
Adolf Helene bei Altlay	2 Hochbausohlen Schachtbetrieb 6 Tiefbausohlen	Entwässerung über den Tiefen Emilianstollen	3,1	Altlayer Bach
St. Franziskusberg bei Monzelfeld	„Schlitzloch“	Wassereinstau	kein oberirdischer Abfluss	Wellersbach

Aurora bei Weiden	Marienstollen 1 Marienstollen 2	Sickerwasser aus verbrochenem Stollen, Überlauf aus offenem Stollen mit Einstau	k.A.	Ebesbach
Wasserschlösschen bei Monzelfeld	Stollen	Versuchsstollen	k.A.	Tiefenbach
Gute Hoffnung bei Werlau	Verbundgrube beidseitig des Rheins	Entwässerung über Ehrenthaler Stollen (rechte Rheinseite)	6,5-6,8	Rhein

Die überwiegende Anzahl der wasserführenden Stollen wies bei den Probenahmen nur eine geringe Schüttung auf (unter 0,5 l/s). Lediglich bei 5 Bergwerken wurden Abflüsse > 1,0 l/s gemessen (Tab. 4).

Tab. 4: Schüttungen der wasserführenden Stollen (teilweise Mehrfachmessungen)

Schüttung (l/s)	<0,5 l/s	>0,5 bis 1,0 l/s	>1,0 bis 5,0 l/s	>5,0 l/s
Anzahl der Stollen	34	1	2	3

Ebenso war die organoleptische Ansprache bei den meisten Wässern unauffällig (farblos, ohne Trübung, geruchslos), lediglich bei den Gruben Kautenbach und Theodor wurden intensive Verfärbungen und Ausfällungen von Eisen- und Manganverbindungen festgestellt. Schwacher Geruch nach  $H_2S$  ließ sich bei den Wässern der Stollen „am Eifer Berg“, „Petrus“ und „Franziskusberg“ wahrnehmen (Abb. 1).

Die Wassertemperaturen betragen meist unter 12,5°C. Lediglich bei den beiden Tiefen Stollen der Grube Kautenbach wurden höhere Temperaturen von bis über 20°C gemessen. Die pH-Werte sind im circumneutralen Bereich. Eine Ausnahme stellen wiederum die Grubenwässer des Tiefen Stollens 1 (TS 1) und des Eleonoren-Stollens der Grube Kautenbach mit Extremwerten bis 2,05 (TS 1) bzw. 5,3 (Eleonoren Stollen) dar.

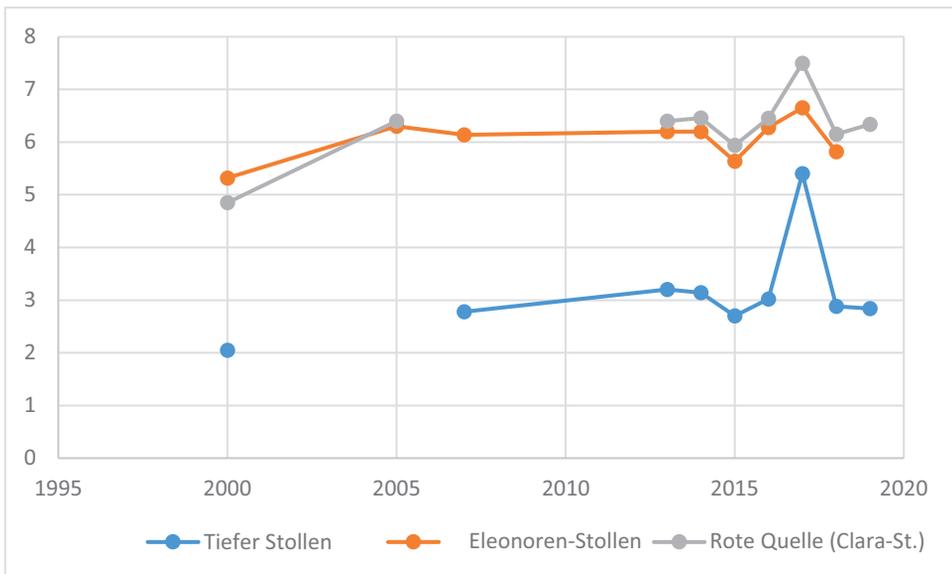


Abb. 8: pH-Werte der Grubenwässer der Grube Kautenbach (Hunsrück).

Die Messwerte für die elektrische Leitfähigkeit betragen zwischen 161  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und 1.756  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , der überwiegende Anteil unterhalb 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  liegt (Abb. 2). Die Extremwerte  $>1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  wurden bei der Grube Kautenbach (bis 1.756  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und der Grube Getrudsegen II (1.478  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) bestimmt.

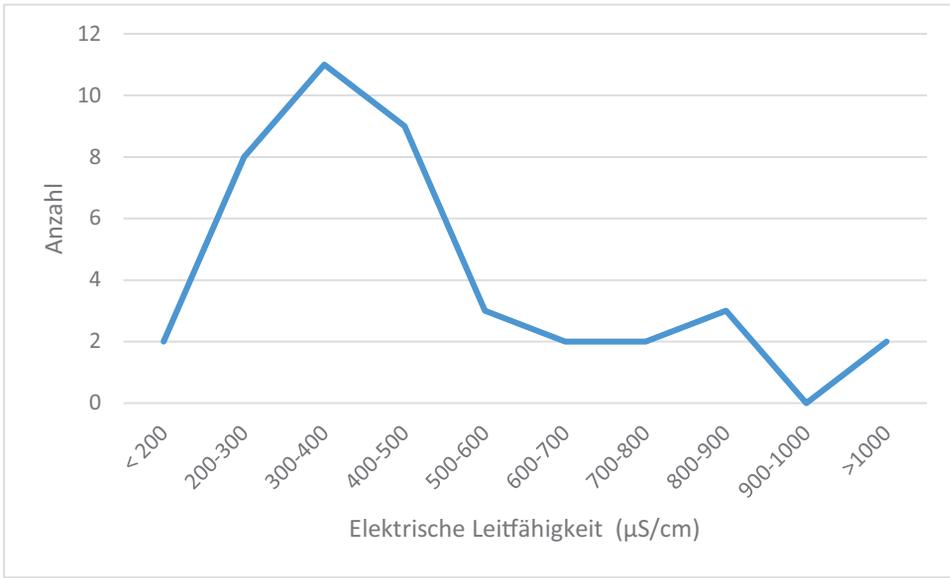


Abb. 9: Elektrische Leitfähigkeiten der Grubenwässer im Hunsrück (von einigen Grubenwässern liegen Wiederholungsmessungen vor, die in die Auswertung einbezogen wurden).

Die gemessenen Sauerstoffgehalte betragen zwischen 0,85 mg/l und 11,3 mg/l. Dabei ist zu beachten, dass die Beprobung der Wässer i.d.R. am Auslauf des Stollenmundloches stattfand, wo ein offenes System gegenüber der Atmosphäre besteht. Z.T. haben die Wässer bereits einen längeren Fließweg im Entwässerungsstollen hinter sich. Vergleichbar weisen auch die gemessenen Redoxpotentiale die zuvor genannten Einschränkungen auf. Die korrigierten Messwerte umfassen ein Spektrum von 223 mV bis 599 mV.

Die Konzentrationen der Hauptkationen und -anionen sind in der folgenden Tabelle 5 zusammengestellt. Auffallend sind die deutlich erhöhten Natriumgehalte bei der Grube Gertrudsegen II mit 130 mg/l sowie bei den Tiefen Stollen der Grube Kautenbach mit bis 63,2 mg/l (WESOŁOWSKI 2006), die Ausreißer darstellen.

Tab. 5: Hydrochemische Beschaffenheit der Grubenwässer des Hunsrücks: Hauptkationen und -anionen.

	K	Na	Mg	Ca	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>
Arithmetisches Mittel	2,01	22,1	23,4	37,1	187	5,04	15,3	57
Minimum	0,4	5,9	3,7	12,9	n.n.	n.n.	4,0	10,3
Maximum	7,04	131	73,8	80,3	1041	19,9	44,3	167

n.n.: nicht nachweisbar

Die Spurenelemente der auslaufenden Grubenwässer sind überwiegend auf einem niedrigen Niveau. Ausreißer stellen (vereinzelt) erhöhte Konzentrationen an Zink, Blei, Kupfer, Cadmium, Arsen, Eisen und Mangan dar.

## 6. Auswertung

Die untersuchten Grubenwässer des Hunsrücks weisen überwiegend eine geringe Mineralisation, circumneutrale pH-Werte und Temperaturen, wie sie für oberflächennahe Grundwässer charakteristisch sind, auf. Ebenso lassen sich nur vereinzelt organoleptische Auffälligkeiten feststellen [Ausfällungen von  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ]. Die Grubenwässer sind hydrochemisch überwiegend durch eine Dominanz der Erdalkalien (>60 eq-%) gegenüber den Alkalien sowie von Hydrogencarbonat gegenüber Chlorid und Sulfat charakterisiert (Abb. 10). Hohe geogene Natrium- und Chloridgehalte lassen sich im Rheinischen Schiefergebirge auf Grundwässer größerer Teufen zurückführen (WIEBER 1999), während erhöhte Sulfatkonzentrationen in NE-Erzgrubenwässern häufig dem Eintrag von Reaktionsprodukten der Oxidation von Sulfiden geschuldet sind. Soweit das Verhältnis der Äquivalentkonzentrationen von Natrium und Chlorid bei annähernd 1 liegt, ist von der Lösung von Kochsalz (NaCl) auszugehen. Bei stärkeren Abweichungen sind andere/weitere geochemische Reaktionen anzunehmen (z.B. Ionenaustauschreaktionen).

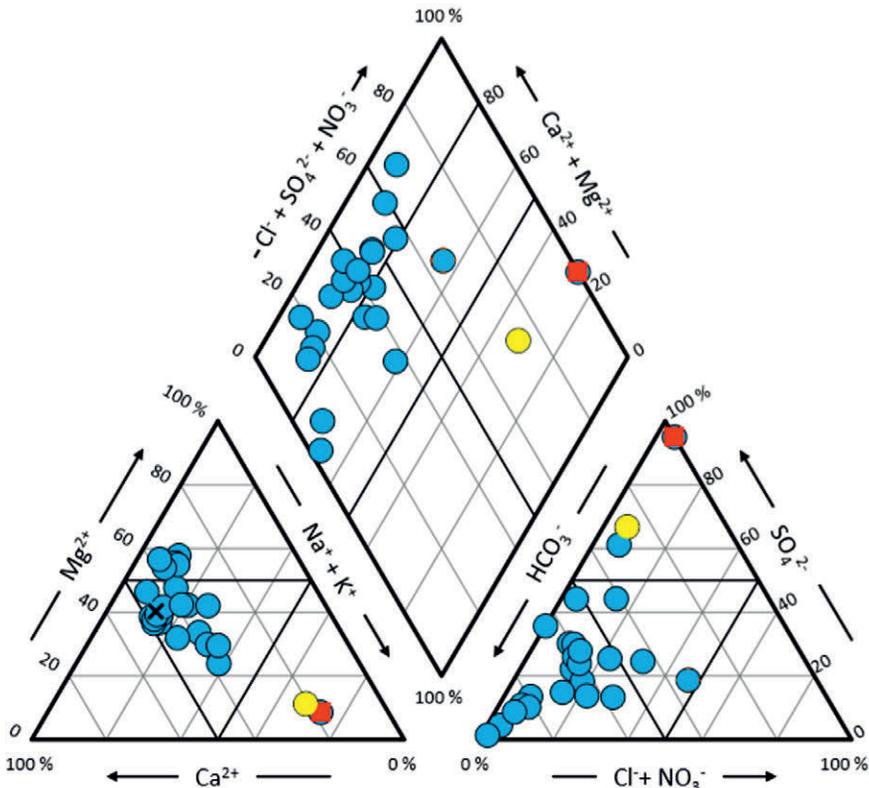


Abb. 10: PIPER-Diagramm der Grubenwässer des Hunsrückreviers (Grube Kautenbach: rot und gelb).

Die überwiegende Anzahl der untersuchten wasserführenden Stollen weist nur geringe Schüttungen von < 1 l/s auf. Sie sind Lagerstätten oder Vorkommen geringer Bedeutung zuzuordnen. Die austretenden Grubenwässer besitzen wegen ihrer geringen Schüttungen sowie geringen Mineralisationen bzw. Frachten keine umweltgeologische Bedeutung. Auch Nitrat wurde nur in geringen Konzentrationen analysiert. Vereinzelt erhöhte Gehalte mit einem Maximalwert von 26 mg/l deuten auf den Eintrag oberflächennaher Grund- und/oder Sickerwässer.

Höhere Wasserschüttungen besitzen ehemals bedeutendere Erzlagerstätten mit entsprechend größeren Bergwerksanlagen:

- Grube Helena und Barbara mit dem Antonstollen bei Bernkastel: Schüttung 5 bis 11 l/s
- Grube Gute Hoffnung bei Werlau: Schüttung 6,5 bis 6,8 l/s
- Grube Adolf Helene bei Altlay: Schüttung 3,1 l/s
- Grube Theodor bei Tellig, Robert Bosch-Stollen: Schüttung 3 l/s
- Grube Kautenbach bei Bad Wildstein: Gesamtschüttung bis 10 l/s

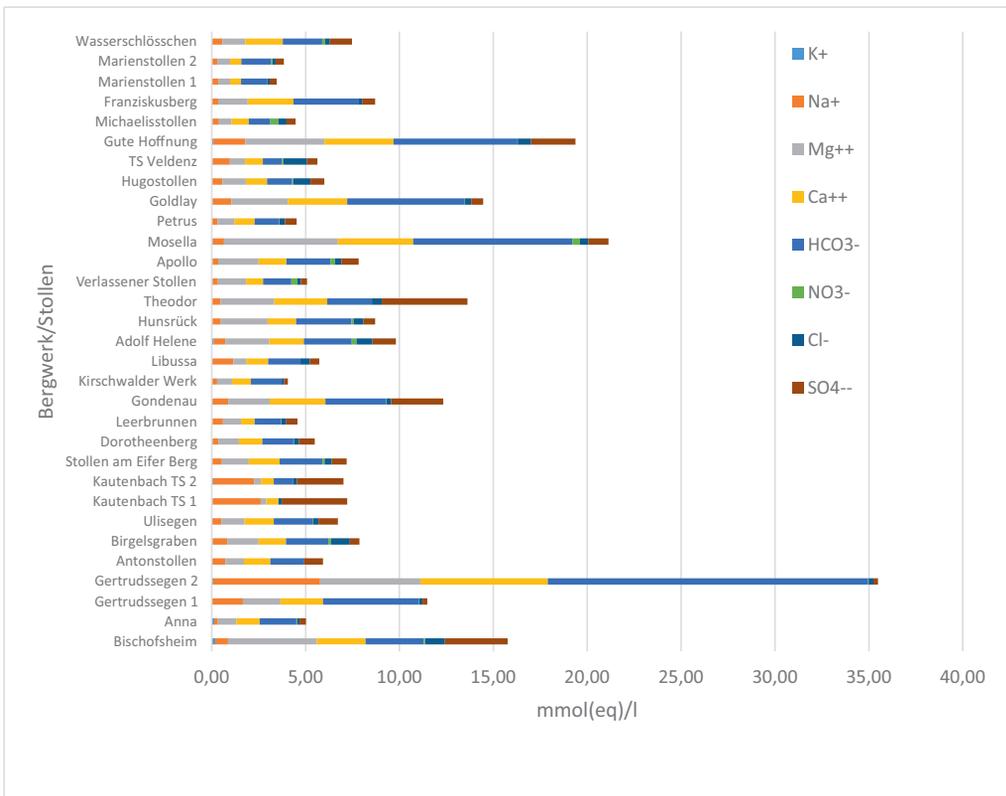


Abb. 11: Balken-Diagramm der Grubenwässer des Hunsrückreviers.

### Helena und Barbara

Die Grubenwässer der Grube Helena und Barbara, die über den Antonstollen austreten, weisen circum neutrale pH-Werte (6,5) auf und sind mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 295 µS/cm gering mineralisiert. Das Grubenwasservorkommen wurde von 1974 bis 2003 als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung genutzt. Hydrochemisch ist es als überwiegend erdalkalisch-

hydrogencarbonatisch zu klassifizieren. Nach Wessołowski (2006) wurde die Nutzung wegen erhöhter Antimonergehalte aufgegeben. Die Konzentrationen der Spurenelemente Blei, Zink, Cadmium und Arsen (1967-1992) liegen im Bereich oder unterhalb der Nachweisgrenze. Eine Gefährdung für die Umwelt durch die Bergwerkswässer lässt sich nicht ableiten.

### **Grube Gute Hoffnung**

Die Grube Gute Hoffnung war die bedeutendste Erzlagerstätte des Hunsrücks und wurde auf beiden Seiten des Rheins betrieben. Die Schüttung am Ehrenthaler Grundstollen (rechtsrheinisch) wurde bei Stichtagsmessungen in den Jahren 2006 und 2011 mit 6,5 bis 6,8 l/s bestimmt. Unmittelbar nach Flutung der Grube geben HERBST & MÜLLER (1966) einen durchschnittlichen Abfluss von 11,6 l/s an. Die von RUSMAN (2011) bestimmte Wassertemperatur betrug 16,2° C. Der pH-Wert ist mit 7,43 schwach alkalisch. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt 860  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und ist damit gering mineralisiert (Summe Hauptanionen und -kationen: 19,8 mmol(eq)/l). Hydrochemisch handelt es sich um ein überwiegend erdalkalisch-hydrogencarbonatisches Wasser. Sulfat kommt mit 114 mg/l vor und lässt sich auf Lösung von Sekundärmineralen der Sulfidoxidation zurückführen. Mit einem größeren Austrag von umweltrelevanten Buntmetallen ist nicht zu rechnen. Die Oxidation von (Di-) Sulfiden mit Protonenfreisetzung ist abgeschlossen bzw. es stehen ausreichend Carbonate zur Pufferung zur Verfügung. Die Grubenwässer werden direkt in den Rhein eingeleitet, mit einer Beeinträchtigung der chemischen und/oder biologischen Gewässergüte durch die Einleitung ist wegen des hohen Abflusses des Gewässers (Pegel Kaub HQ bis > 7.000 m<sup>3</sup>/s) nicht zu rechnen.

Für die Grube Gute Hoffnung (Abb. 3) wurden in der Literatur auch quantitative Angaben zur Wasserhaltung und Entwässerung publiziert (HERBST & MÜLLER 1966). Durch die Wasserhaltung während der Betriebsphase mussten große Volumen Grubenwasser gefördert werden (Tab. 2). So fielen in der Summe für die Gesamtgrube mit ihren rechts- und linksrheinischen Teilen bis ca. 53 l/s an (Tab. 2). Bei Einstau bis oberhalb der Rheinstrecke (180 m Tiefbausoehle) wurden noch 23,1 l/s gehoben. Bei einem weiteren Anstieg bis auf das Niveau des Ehrenthaler Stollens geben HERBST & MÜLLER (1966) 11,6 l/s an. Neuere Messungen von WIEBER (2006) und RUSMAN (2011) zeigen eine Abnahme auf 6,5 bis 6,8 l/s. Gründe für die Unterschiede der Schüttungen bei unterschiedlichen Grubenwasserständen in den Bergwerken liegen darin, dass bei tieferen Grundwasserständen höhere Mengen an Grundwasser von unten wegen der niedrigen Druckverhältnisse aufsteigen (können). Der seitliche Grundwasserzufluss in die Bergwerke verringert sich bei steigenden Wasserständen aufgrund der Abnahme der hydraulischen Gradienten. Dementsprechend wird auch die Reichweite des Absenkungstrichters geringer (WIEBER 1999). Aber auch bei dem Grubenwasserteil aus der Grundwasserneubildung kommt es zu Veränderungen. Während der der aktiven Phase kam es über Pingen und weitgehend unbewachsenen Betriebsgeländen und Haldenarealen zu höherer Grundwasserneubildung als nach Rekultivierung. Darüber hinaus wird durch die erwartete Verkürzung der vegetationslosen Zeit infolge klimatischer Veränderungen die Grundwasserneubildung weiter reduziert.

### **Grube Adolf Helene**

Die Grube Adolf Helene befindet sich bei Altlay im Altlayer Bachtal und entwässert über den Tiefen Emilian-Stollen in das Gewässer. Das austretende Grund-/Grubenwasser wurde in der Vergangenheit zur privaten Trink- und Brauchwassergewinnung genutzt. Das Wasser ist neutral (pH 7,0 bis 7,1), ohne organoleptische Auffälligkeiten und gering mineralisiert (410 bis 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Bei den Hauptkationen dominieren die Erdalkalien, bei den Anionen stellt Hydrogencarbonat den höchsten Anteil (52 eq-%), allerdings kommen auch Sulfat (27 eq-%) und Chlorid

(22 eq-%) mit höheren Anteilen vor. Sulfat lässt sich auf Lösung von Verwitterungsmineralien (z.B. Gips) zurückführen. Natrium (15 eq-%) und Chlorid können aus größerer Tiefe aufsteigen oder durch Ionenaustauschvorgänge (Na) freigesetzt werden. Nitrat zeigt mit 19 mg/l einen Einfluss auch oberflächennaher Grundwässer. Bei den Spurenelementen kommt Zink mit Gehalten bis 3,97 mg/l erhöht vor. Humantoxikologisch gehört Zink zu den lebensnotwendigen Spurenelementen und zeichnet sich bei höheren Konzentrationen in wässrigen Lösungen durch einen bitteren Geschmack aus. Toxikologische Relevanz für Menschen besteht erst bei sehr hohen Konzentrationen. Allerdings regieren aquatische Lebewesen auf erhöhte Zinkgehalte empfindlich. Begrenzende Mineralphase für Zink in (Gruben-) Wässern ist Zinkcarbonat (Smithsonit), das jedoch eine unter umweltgeologischen Gesichtspunkten relativ gute Löslichkeit besitzt (10 mg/l bei 15° C).

### Grube Theodor

Die Grube Theodor befindet sich bei Tellig und ist durch einen Schacht und 9 Tiefbausohlen erschlossen. Entwässert wird das geflutete Grubengebäude über die 5. Tiefbausohle bzw. dem Robert Bosch-Stollen, der vom Schacht zum Peterswalder Bachtal vorgetrieben wurde (Abb. 7). Vor dem verbrochenen Stollenmundloch hat sich ein Teich gebildet, in dem es zu intensiven Verockerungen durch ausfallendes  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  kommt. Von dort fließt es mit ca. 3 l/s über eine Erosionsrinne zum Peterswalder Bach. Durch natürliche Reinigungsprozesse nimmt die Trübung und Verfärbung mit zunehmender Fließdauer immer weiter ab. An der Mündung in den Vorfluter sind keine organoleptischen Auffälligkeiten mehr erkennbar. Die Entnahme der Wasserproben fand direkt am Mundloch statt.

Die am Stollenmundloch austretenden Grubenwässer weisen circum neutrale pH-Werte (6,5) und eine geringe Mineralisation (elektrische Leitfähigkeit ca. 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) auf. Die Kationen werden durch die Erdalkalien Calcium und Magnesium mit jeweils 46 eq-% dominiert. Bei den Anionen herrscht Sulfat (62 eq-%) vor. Hydrogencarbonat stellt nur einen Anteil von 32 eq-%. Die hohen Sulfatanteile sind auf die große Mächtigkeit der ungesättigten Zone (Abb. 7) sowie Lösung sulfatischer Sekundärminerale zurückzuführen. Das am Stollenmundloch des Robert Bosch-Stollens austretende Grubenwasser ist insbesondere durch hohe Zinkgehalte (bis 23,6 mg/l) gekennzeichnet. Auffallend sind außerdem erhöhte Gehalte an Nickel und Arsen. Im Hunsrück sind häufig auffallend erhöhte Arsen- und Nickelgehalte zu beobachten. Sie lassen sich möglicherweise auf feinverteilt auftretende Sulfide im Hunsrückschiefer zurückführen. Kurz vor der Einleitung in den Peterswalder Bach sind die Zink- und Arsengehalte bis unter die analytische Nachweisgrenze zurückgegangen. Dabei sind natürliche Reinigungsprozesse ausschlaggebend. Arsen fällt mit Eisen (Stollenmund: bis 19 mg/l; Einleitstelle: 0,15 mg/l) im  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  aus. Die Zinkgehalte reduzieren sich durch Sorptions- und Ausfällungsprozesse auf der Fließstrecke bis zur Einleitung in den Vorfluter bis unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/l. Schädliche Einflüsse auf den Peterswalder Bach sind daher nicht zu erwarten.

### Grube Kautenbach

Bei der Grube Kautenbach wurden Wasseraustritte an drei Stollen seit mehreren Jahren regelmäßig beprobt. Diese lassen sich hydrogeologisch wie folgt beschreiben:

- Rote Quelle (Clara-Stollen): Sickerwasser der Hochbausohle, ungesättigte Zone
- Tiefer Stollen 1 (Kautenbacher Stollen): Grubenwasser der gesättigten Zone mit Anteilen von Sickerwasser sowie Mineralwasser
- Tiefer Stollen 2 (Eleonoren-Stollen, bachabwärts): Grubenwasser mit Thermalwasser, gesättigte Zone mit (geringem) Anteil Sickerwasser

Die untersuchten Grubenwässer unterscheiden sich hydrochemisch deutlich voneinander: An der Roten Quelle treten Sickerwässer mit einer sehr geringen Schüttung aus. In den Sommermonaten findet z.T. kein erkennbarer Austritt statt und die „Quelle“ ist versiegt/ausgetrocknet. Vom Stollenmundloch fließt das Grubenwasser nach kurzem Fließweg in einen namenlosen Bach, der seinerseits in den Kautenbach mündet. Die Wässer weisen schwach saure bis circum neutrale pH-Werte (um pH 6) auf und sind nur gering mineralisiert (elektrische Leitfähigkeit 220 – 282  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Hydrochemisch handelt es sich um überwiegend sulfatische erdalkalische Wässer mit höherem Alkalianteil (FURTAK & LANGGUTH 1967). Es lassen sich leicht erhöhte Gehalte an Kupfer (bis 111  $\mu\text{g}/\text{l}$ ), Nickel (61  $\mu\text{g}/\text{l}$ ) und Eisen (1,2  $\text{mg}/\text{l}$ ) feststellen.

Die Grubenwässer des Tiefen Stollens 1 (TS 1) sind durch saure pH-Werte (überwiegend um pH 3) sowie schwankende Mineralisation (elektrische Leitfähigkeit 420  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 1.756  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) gekennzeichnet. Die Wassertemperatur beträgt über 20° C und weist auf den Zutritt von Thermalwässern hin. In Anlehnung an die Klassifikation von FURTAK & LANGGUTH (1967) handelt es sich um überwiegend sulfatische (95 eq-%), alkalische (73 eq-%) Wässer. Die sauren pH-Werte im Bereich des Aluminium-Puffers zeigen, dass die Oxidation der (Di-)Sulfide noch nicht abgeschlossen ist. Über die Sulfatgehalte (101  $\text{mg}/\text{l}$  bis 840  $\text{mg}/\text{l}$ ) lässt sich der Umfang der Sulfidoxidation abschätzen. Unter vereinfachten Annahmen und Vernachlässigung der Sulfatgehalte aus der Lösung von Sekundärmineralien werden pro Liter Wasser 1 bis 8 mmol Sulfid-Schwefel zu Sulfat-Schwefel oxidiert. Infolge der sauren pH-Werte kommt es zur erhöhten Lösung von Aluminium, Arsen, Blei, Kupfer, Nickel und Zink. Auffallend ist der bei der Probenahme in 2017 gemessenen pH-Wert von 5,4.

Zur Oxidation der (Di-)Sulfide kommt es unter aeroben Bedingungen, die in der ungesättigten Zone im Gangbereich vorliegen. Möglicherweise haben sich temporär die Verhältnisse der über den Tiefen Stollen 1 austretenden Grubenwässer dahingehend verändert, dass der „saure“ Sickerwasseranteil aufgrund der Wetterverhältnisse (Starkregenereignisse mit Fremdwasserzuflüssen) geringer war.

Die Grubenwässer des Eleonorenstollens (Tiefer Stollen 2) weisen im Gegensatz zum Tiefen Stollen 1 nur schwach saure bis circum neutrale pH-Werte (überwiegend über pH 6) auf. Die Mineralisation ist geringer (elektrische Leitfähigkeit 389  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 484  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Die Temperaturen sind mit über 20° C ebenfalls erhöht. Hydrochemisch handelt es sich ebenfalls um sulfatische (67 eq-%) überwiegend alkalische (68 eq-%) Wässer, wobei die Anteile an Sulfat zu Gunsten von Hydrogencarbonat (27 eq-%) gegenüber den Grubenwässern des Tiefen Stollens 1 deutlich reduziert sind. Das Hydrogencarbonat lässt sich auf einen höheren Anteil an Mineral-/Thermalwasser zurückführen. Die Spurenelemente Aluminium, Arsen, Blei, Kupfer, Nickel und Zink sind zwar auch erhöht, allerdings auf einem deutlich geringeren Niveau.

Zur Bewertung der Auswirkungen der Stollenwassereinleitungen auf den Kautenbach wurden im Zu- und Abstrom ergänzende Probenahmen durchgeführt. Die gemessenen pH-Werte des Kautenbachs liegen gleichbleibend bei 7,3. Direkt an den Einleitstellen werden die sauren und schwach sauren pH-Werte der Grubenwässer durch Verdünnung neutralisiert und Aluminium fällt unmittelbar aus. Die Sulfatgehalte erhöhen sich im Oberflächengewässer ebenfalls durch die Einleitung nur unerheblich von 21  $\text{mg}/\text{l}$  auf 27  $\text{mg}/\text{l}$ . Von den Spurenelementen ist einzig bei Kupfer eine Erhöhung von <0,001  $\text{mg}/\text{l}$  auf 0,024  $\text{mg}/\text{l}$  im direkten Abstrom der Einleitungen nachzuweisen.

Die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) enthält keine zulässigen Höchstkonzentrationen für gelöstes Kupfer (ZHK-UQN) in Oberflächengewässern. Festgelegt wurden aber Jahresdurchschnittswerte als Umweltqualitätsnorm (JD UQN) für Kupfer als Schwebstoff bzw. im Sediment von 160 mg/kg. Feststoffuntersuchungen wurden vorliegend jedoch nicht durchgeführt. Daher werden nachfolgend die durch stärkere Grubenwassereinleitungen beaufschlagten Gewässer mit den Ergebnissen der Gewässergütekarten von Rheinland-Pfalz abgeglichen. Dabei gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass die Oberflächengewässer einer Vielzahl weiterer natürlicher, anthropogener sowie bergbaubedingter Immissionen ausgesetzt sind.

Derzeit wird die Gewässergütekarte (GGK) überarbeitet und soll im Jahre 2021 veröffentlicht werden. Daher muss auf die älteren Gewässergütekarten zurückgegriffen werden.

Die durch Einleitungen von Grubenwässern des historischen Erzbergbaus betroffenen Oberflächengewässer 3. Ordnung waren gemäß der Gewässergütekarte 2005 unbelastet bis gering belastet (Tab. 6). 2010 ist die chemische Gewässergüte bei den betroffenen Gewässern durchgehend als gut bewertet. Defizite bestehen jedoch beim ökologischen Zustand von Kautenbach und Veldenzbach. Der ökologische Zustand hat sich bei der Beurteilung 2015 weiter verbessert und ist lediglich im Unteren Kautenbach unbefriedigend.

Tab. 6: Gewässergüte von Gewässern im Hunsrück (Literaturrecherche).

Gewässer	Bergwerk	Gewässergüte-Karte 2005	Gewässerzustandsbericht 2010	Ökologischer Zustand 2015
Rhein	Gute Hoffnung		UQN weitgehend eingehalten	mäßig
Kautenbach	Kautenbach	gering- bis unbelastet	Ökologischer Zustand: 4 Chemischer Zustand: gut UQN: eingehalten	Unterer Kautenbach: unbefriedigend Oberer Kautenbach: sehr gut
Peterswalder Bach	Theodor	unbelastet	Zählt zum Gewässersystem Altlayer Bach	
Altlayer Bach	Adolf Helene und Theodor	gering- bis unbelastet	Ökologischer Zustand: 2 Chemischer Zustand: gut UQN: eingehalten	gut
Tiefenbach	Helena und Barbara	gering- bis unbelastet	Tiefenbach zählt zum Gewässersystem Veldenzbach Ökologischer Zustand: 4 Chemischer Zustand: gut	gut
Veldenzbach		gering- bis unbelastet		

Eine (großflächige) negative Beeinflussung der chemischen und ökologischen Güte der „kleinen“ Gewässer des Hunsrücks (3. Ordnung) durch Grubenwassereinleitungen ist nicht erkennbar. Ein negativer Einfluss auf die Gewässer erster Ordnung (Mosel und Rhein) ist daher erst recht auszuschließen. Der Rhein und die Mosel sind 2015 hinsichtlich des ökologischen Potentials als mäßig (Rhein) bis unbefriedigend (Mosel) bewertet. Dies ist jedoch auf andere Gründe

als den ehemaligen rheinland-pfälzischen Erzbergbau (z.B. Staustufen, mangelnde Durchgängigkeit, Gewässerstrukturen, Begradigung etc.) zurückzuführen. Diese wasserwirtschaftlichen Einstufungen sind zudem bereits an den oberstromigen Landesgrenzen vorhanden.

## 7. Ausblick

Der Nichteisenmetallerzbergbau im Hunsrück erfolgte in einer Vielzahl überwiegend unbedeutender Gruben. Daher sind auch die Einleitwässer aus den Bergwerken meist gering mineralisiert und weisen in der Mehrzahl nur geringe Schüttungen auf. Zum besseren Verständnis der natürlichen geochemischen Selbstreinigungskräfte würde sich eine wissenschaftliche Aufarbeitung am Beispiel der Grube Theodor anbieten, bei der sich die Buntmetallgehalte (gelöst) auf dem kurzen Fließweg vom Stollenmundloch (z.B. 23 mg/l Zink) auf Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze an der Mündung in den Vorfluter verringern. Dabei könnte auch der Aspekt der Rohstoffgewinnung (z.B. Zink und/oder Kupfer) aus Grubenwässern näher untersucht werden.

## Literatur

- Boos, J. (2013): Hydrogeochemische Untersuchung an Bad Wildsteiner Grubenwässern. – Projektarbeit, 17 S., 6 Tab., 6 Abb.; Mainz (unveröff.).
- DUNKER, W. (1884): Beschreibung des Bergreviers Coblenz II. – 90 S.; Bonn.
- FURTAK, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – Mem. IAH-Congress, 1965, VII: 89-96, 5 Abb.; Hannover.
- HEILBRUNN, J. (2014): Bericht zur Exkursion „Hydrochemie und Altlasten“. – Projektarbeit, 26 S., 22 Abb., 7 Tab.; Mainz (unveröff.).
- HERBST, F. & MÜLLER, H.-G. (1966): Der Blei-Zinkerzbergbau im Hunsrück-Gebiet. – 48 S., Anh. mit 35 Abb.; Bad Ems.
- HERTH, W. & ARNDTS, E. (1995): Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung. – 3. Aufl., 357 S., 152 Abb., 12 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- HEYL, K.E. (1972): Bäderbuch Rheinland-Pfalz. – 178 S.; Koblenz.
- HINZ, C. (2014): Geochemische Untersuchung der Abwässer stillgelegter Bergbaustollen im Hunsrück. – Projektarbeit, 16 S., 10 Abb., 9 Tab.; Mainz (unveröff.).
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 383 S., 120 Abb., 90 Tab.; Heidelberg.
- KRONZ, A. (2005): Erzbergbau, Buntmetallmineralisation und Silber-Metallurgie im Bereich der mittleren Mosel. – Zeitschrift zur Geschichte des Berg- und Hüttenwesens – Fischbacher Hefte, 11/1: 4-33; Idar-Oberstein (Charivari).
- LANDESAMT FÜR UMWELT, WASSERWIRTSCHAFT UND GEWERBEAUF SICHT RHEINLAND-PFALZ & MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN (Hrsg., 2010): Gewässerzustandsbericht 2010 - Ökologische Bilanz zur Biologie, Chemie und Biodiversität der Fließgewässer und Seen in Rheinland-Pfalz. – 222 S., Kartenanlage; Mainz.
- LANDESAMT FÜR UMWELT (2015): Karte „Ökologischer Zustand/ökologisches Potential der Oberflächengewässer in Rheinland-Pfalz“. – Stand Oktober 2015; Mainz.
- LEHMANN, C. (2014): Untersuchung von Grubenwässern der Grube Kautenbach. – Projektarbeit, 17 S., 14 Abb., 11 Tab.; Mainz (unveröff.).

- LEICHSENRING, G. M. (2019): Hydrogeochemische Bewertung von Grubenwässern im Hunsrück. – Masterarbeit, 71 S., 11 Tab., 41 Abb., Anh.; Mainz (unveröff.).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN (2004): Vorläufige Ergebnisse der Bestandsaufnahme der rheinland-pfälzischen Gewässer nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. – 150 S., 34 Abb.; Mainz.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN (2005): Gewässergütekarte Rheinland-Pfalz. – Mainz.
- MORGEN, D. (2014): Gewässerbeprobung der Grube „Kautenbach“. – Projektarbeit, 12 S., 9 Abb., 5 Tab.; Mainz (unveröff.).
- MÜLLER, S. (2014): Projektarbeit „Hydrochemie und Altlasten“ über die Beschaffenheit von Grubenwässern der ehemaligen Erzgrube „Kautenbach“. – 11 S., 5 Tab., 6 Abb.; Mainz (unveröff.).
- NEUMANN, C. (2014): Hydrochemische Analyse von Grubenwässern: Bad Wildstein. – Projektarbeit, 16 S.; Mainz (unveröff.).
- REICHERT, S. (2007): Möglichkeiten und Grenzen passiver Sanierungstechnologien für Grubenwässer des ehemaligen Erzbergbaus in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von zwei Fallbeispielen. – Dipl.-Arb., 231 S.; Koblenz (unveröff.).
- ROSENBERGER, W. (1971): Beschreibung rheinland-pfälzischer Bergamtsbezirke, Bd. 3, Bad Kreuznach. – 376 S., 1 Kartenbeilage; Bad Marienberg.
- ROSENBERGER, W. & KLOFT, J. (1965): Der Blei- und Silbererzbergbau bei Bernkastel (Mosel) – Ein Beitrag zur Geschichte des Bergregals in Kurtrier. – Der Anschnitt, 17: 14-22; Essen.
- RUSMAN, A. (2011): Geothermische Potentialanalyse des stillgelegten Erzbergwerks „Consolidierte Gute Hoffnung“. – Bsc.-Arbeit, 123 S., 18 Abb., 15 Tab., Anh.; Bingen (unveröff.).
- SCHMIDT, A. (2014): Die Beschaffenheit von Grubenwässern der ehemaligen Grube „Kautenbach“ – Projektarbeit, 13 S., Anh.; Mainz (unveröff.).
- SICHARDT, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen. – 89 S., 40 Abb., 19 Tab.; Berlin.
- SPITZ, R. (2014): Bericht zum hydrochemischen Praktikum. – Projektarbeit, 11 S., 5 Abb., 3 Tab., Mainz (unveröff.);
- ULLMANN, T. (2019): Laborbericht zu den Wasserproben aus dem Raum der stillgelegten Grube „Kautenbach“. – Projektarbeit, 11 S., 3 Abb., 8 Tab.; Mainz (unveröff.).
- UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2016): Wasserrahmenrichtlinie. Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/wasser-rahmenrichtlinie>, 2016 vom 20. Juni 2016 (BGBl. S. 1373).
- WESOLOWSKI, S. O. (2006): Erfassung, Untersuchung und umweltgeologisch/-rechtliche Bewertung von Grubenwässern des Altbergbaus auf Buntmetalle im Hunsrück. – Dipl.-Arb., 205 S., Anh., 46 Tab., 53 Abb.; Koblenz (unveröff.).
- WIEBER, G. (1994): Das ehemalige Erzrevier an der Unteren Lahn – hydro- und geochemische sowie umweltgeologische Verhältnisse unter Berücksichtigung der Rückstände aus der Erzaufbereitung. – Gieß. Geol. Schr., 50: 284 S.; Gießen (Diss.).
- WIEBER, G. (1999): Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilberbergbaus an Beispielen des Rheinischen Schiefergebirges und Beispielen der Saar Nahe Senke. – Habilitationsschrift, 250 S.; Gießen.
- WIEBER, G. (2003): Beschaffenheit von Grubenwässern des Erzbergbaus. – Gieß. Geol. Schr., 70: 21-57; Gießen.
- WOLKERSDORFER, C. (2008): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. – 466 S., 126 Abb., 34 Tab.; Heidelberg (Springer).

### **Gesetze und Verordnungen:**

- BBergG (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 237 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I, S. 1328).
- WRRL (2000) EU Wasserrahmenrichtlinie Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (EU-WRRL) vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (ABl. L 327 vom 22. Dezember 2000, S. 1).
- OGewV Oberflächengewässerverordnung: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die durch Artikel 255 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I, S. 1328) geändert worden ist.
- WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408) geändert worden ist.

Manuskript eingegangen am 05.09.2020

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. GEORG H.E. WIEBER  
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz  
Emy Roeder Straße 5  
D-55129 Mainz  
E-Mail: georg.wieber@lgb-rlp.de

Johannes Gutenberg-Universität  
Institut für Geowissenschaften  
Hydrogeochemie  
Johann-Joachim-Becher-Weg 21  
D-55128 Mainz  
E-Mail: wieber@uni-mainz.de