

Hydrogeologie und Wärmefluss der gefluteten Grube Mercur in Bad Ems, Rheinisches Schiefergebirge

**Hydrogeology and heat flow of the flooded Mercur Mine at Bad Ems,
Rhenish Massif**

Von GEORG WIEBER¹

Mit 8 Abbildungen und 3 Tabellen

Zusammenfassung

In Bad Ems (Rheinisches Schiefergebirge) wurden bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts gangförmige Buntmetallerze abgebaut. Der Bergbau erfolgte bis in Tiefen von annähernd 1.000 m. Nach der Flutung der Bergwerksanlagen entstand hydraulisch ein System kommunizierender Röhren mit hohen Fließgeschwindigkeiten. Auf den gefluteten Tiefbausohlen der Grube Mercur treten Thermalwässer der Emser Thermen zu. Die gefluteten Bergwerksanlagen entwässern vollständig über den Tiefen Stollen mit einer Schüttung von 35 l/s und einer Temperatur von 25 °C. Das geothermische Potential der frei auslaufenden Wässer beträgt ca. 3.000 kW und entspricht dem Heizbedarf von ca. 300 modernen Einfamilienhäusern.

Abstract

Bad Ems, Rhenish Massif (Germany), was an important non-ferrous ore mining district until the 20th century. Sulfide veins were mined to a depth of nearly 1,000 m. After flooding the mine, hydraulically a system of communicating pipes with high flow velocities developed. Springs of thermal water flow out at the deeper levels of the abandoned mine. The flooded mine is actually drained by a deep gallery which dewateres the mine continuously with about 35 l/s and a temperature of about 25 °C. The geothermal potential of this water adds up to nearly 3,000 kW and corresponds to the heating demand of 300 modern single family houses.

Schlüsselwörter: Geflutete Erzbergwerke, Bad Ems, Thermalwasser, warme Grubenwässer, geothermisches Potential

¹Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. G. WIEBER, Institut für Geowissenschaften, Hydrogeologie, Becherweg 21, D-55099 Mainz. E-Mail: wieber@uni-mainz.de.

Keywords: Flooded ore mines, Bad Ems, thermal water, thermal mine water, geo-thermal potential

1. Einleitung

Die Kurstadt Bad Ems an der Lahn (Rheinland-Pfalz, Rheinisches Schiefergebirge) ist bekannt für die Emser Thermen und die gleichnamigen Pastillen. In nur ca. 800 m Luftlinie von den Thermen entfernt ging in Bad Ems auch ein bedeutender Buntmetallerzbergbau um (Abb. 1). Auf den Tiefbausohlen der Grube Mercur kam es während der Betriebsphase zu erheblichen Zutritten von Thermalwässern. Mit zunehmender Teufe der Bergwerke und damit einhergehender stärkerer Wasserhaltung ließ die Schüttung der gefassten Thermalquellen im Stadtgebiet nach. Sie versiegten sogar vorübergehend (DENNER 1956). Zwischen den Bergbaubetreibern und der Wasserwirtschaft wurde Jahrzehnte darüber gestritten, ob der Bergbau für die nachlassenden Schüttungen der Thermalwasserquellen verantwortlich war. In die Literatur ging dieser Streit als die „Emser Quellen-Bergwerksfrage“ (DENNER 1956) ein. Abschließend wurde der Zusam-

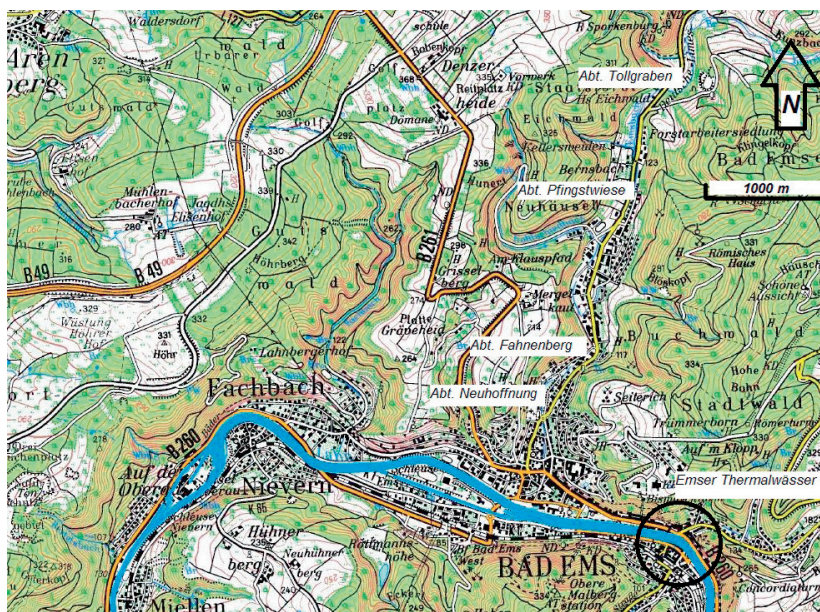


Abb. 1: Topographische Karte der Umgebung von Bad Ems mit Betriebsstandorten der Grube Mercur.

Fig. 1: Topographical map of Bad Ems and surrounding area with locations of the Mercur Mine.

menhang zwischen Bergbau und Thermen durch ein großes Naturexperiment nachgewiesen: Im Zweiten Weltkrieg musste die Grubenwasserhaltung vorübergehend eingestellt werden und mit dem ansteigenden Grubenwasserspiegel nahm die Schüttung der Thermen wieder zu. Allerdings treten auch jetzt noch nach der endgültigen Stilllegung der Gruben warme Wässer auf den gefluteten Tiefbau- sohlen zu und fließen über den Stadtstollen (Tiefer Stollen) in den Emsbach.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Klärung der Grundwasser- hydraulik und eine Abschätzung des geothermischen Potentials der frei auslau- fenden Grubenwässer.

2. Geologisch-hydrogeologische Übersicht

Geologisch liegt Bad Ems im Rheinischen Schiefergebirge und ist ein Teil der Rhenoharzynischen Zone des Variskischen Gebirges. Bad Ems liegt an der Unteren Lahn, die sich tief in das Rheinische Schiefergebirge einschneidet und geo- graphisch mit ihrem Ost–West-Verlauf die Grenze zwischen dem Taunus im Süden und dem Westerwald im Norden darstellt.

An der Lahn befinden sich Mineralwasserquellen, von denen die Emser Ther- men sicher die größte Bedeutung besitzen. Überregional bekannt sind aber auch die Fachinger Quellen sowie der Geilnauer Sprudel (CARLÉ 1975; WIEBER & PAHL 2006). Daneben gibt es noch eine Vielzahl eisenhaltiger, CO₂-führender Sauerbrunnen.

In der Region um Arzbach, Bad Ems und Braubach stehen unterdevonische Sedimentgesteine der Oberems-Stufe an (EHRENDREICH 1958; MITTMEYER 2008). Die Ton-, Silt- und (quarzitischen) Feinsandsteine werden als Emsquarzit, Hohenrheiner und Laubacher Schichten, Flaser- und Kieselgallenschiefer bezeich- net. Sie erreichen eine Gesamtmächtigkeit von ca. 950 m (Tab. 1).

Die Gesteine des Oberemsiums bilden Kluftgrundwasserleiter unterschiedlicher Durchlässigkeiten. Sie lassen in der Regel nur eine geringe Grundwasserneubildung zu und besitzen auch nur ein geringes Wasserspeichervermögen. Größere Wasser- wegsamkeiten können Quarz- oder Erzgänge, klüftige Quarzite und quarzitische

Tab. 1: Stratigraphie des Oberen Emsiums im Gebiet von Bad Ems (MITTMEYER 2008; EHRENDREICH 1958).

Tab. 1: Stratigraphy of the Upper Emsium in the area of Bad Ems (MITTMEYER 2008; EHRENDREICH 1958).

Stufe	Unterstufe	Gliederung (MITTMEYER 2008)	Mächtigkeit (m) zwischen Arzbach und Braubach (EHRENDREICH 1958)
Oberes Emsium	Kondel	Kieselgallenschiefer	bis 300
		Flaserschiefer	ca. 100
	Laubach	Laubach-Schichten	ca. 200
	Lahnstein	Hohenrhein-Schichten	200–250
		Emsquarzit	120–140

Sandsteine (Emsquarzit) sowie vulkanische Gesteine besitzen. Hier bilden sich auch Wasservorkommen mit lokaler Bedeutung. Hydrogeologisch herausragende Bedeutung besitzt im bearbeiteten Gebiet der Emser Quellensattel (KOCH 1881; KAYSER 1892) mit den darin zirkulierenden Emser Thermalwässern.

Das geologische Profil von Bad Ems besteht vereinfacht von West nach Ost aus folgenden tektonisch-geologischen Einheiten: Gang-Mulde – Emser Quellensattel – Emser Mulde (Abb. 2). An der Westflanke des Quellensattels sind die oberemsischen Gesteine spezialgefaltet und durch mehrere Störungen gegeneinander versetzt. Ein einfacheres tektonisches Bild zeigt sich an der Ostflanke des Quellensattels, wo die Gesteine gleichmäßig in Richtung Osten einfallen (Abb. 2).

Zum Aufstieg der Emser Thermalwässer kommt es im Bereich der Achse des Emser Quellensattels mit faltungsbedingten hohen Gebirgsdurchlässigkeiten. Die CO₂-Aufstiege beschränken sich auf den Bereich der Sattelachse, wo die Quarzite durch das Einschneiden der Lahn freigelegt wurden. Die überlagernden, stratigraphisch jüngeren Ton- und Siltsteine besitzen überwiegend eine zu geringe (Gebirgs-)Durchlässigkeit; sie stellen hydrogeologische Barrieren dar. Zum freien Austritt von CO₂ und Tiefenwässern kommt es daher nur in dem Bereich der Sattelachse, wo die klüftigen Quarzite durch Erosion der Lahn freigelegt wurden. In der Lahn sind dort aufsteigende Gasblasen deutlich zu erkennen.

3. Erzbergbau in Bad Ems

Neben dem Emser Thermalwasservorkommen sind die variskischen Buntmetallerzlagertstätten eine weitere geologische Besonderheit. Es handelt sich um steil einfallende, hydrothermal gebildete Gänge. Bauwürdig waren vor allem silberhaltiger Bleiglanz, Zinkblende und Kupfersulfide. Die Gangart besteht aus Quarz und Siderit. Der Bergbau erreichte Teufen von annähernd 1.000 m. Die Bad Emser Lagerstätten zählen zum NE–SW-streichenden Emser Gangzug (HERBST & MÜLLER 1964). Weitere bedeutende Lagerstätten dieses Gangzuges waren die Gruben Rosenberg (Braubach) und Friedrichsseggen (Lahnstein).

In Bad Ems befanden sich die bedeutendsten Lagerstätten am östlichen Anstieg vom Emsbachtal zum Westerwald (Abb. 1). Die Mundlöcher der Tiefen Stollen befinden sich in topographischen Höhen von 82,48 bis 139,92 m NN (Abb. 1, Abb. 4). Der östlich angrenzende Höhenzug erreicht im Bereich der bearbeiteten Bergwerke Höhen von bis 454 m NN (Schöne Aussicht). Die Tiefbausohlen wurden nach Aufgabe des Bergbaus und Einstellung der Wasserhaltung geflutet.

Die ehemalige Grube Mercur setzt sich aus vier Abteilungen (Abb. 1, 4) zusammen, die zunächst als eigenständige Gruben betrieben wurden (WIEBER 2005). Dies sind (von N nach S):

Die Abteilung Tollgraben ist durch den Tollgraben-Stollen aufgeschlossen. Das Mundloch befindet sich bei etwa 140 m NN. Der Emser Gang beginnt im Norden mit dem Oberen Tollgraben-Trum. Auf den oberen Sohlen beträgt die streichende Länge 80–100 m bei einer Mächtigkeit von 0,2–0,5 m. Außerdem wurde das N–S-streichende 6. Mittel abgebaut (EHRENDREICH 1958).

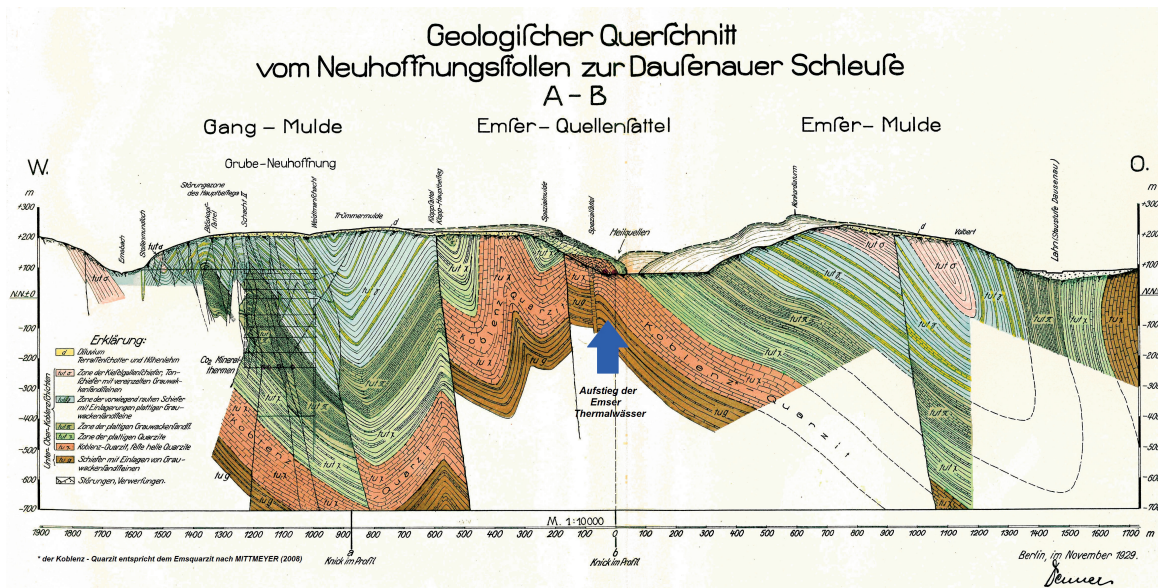


Abb. 2: Geologisches Profil von Bad Ems (DENNER 1929, verändert).

Fig. 2: Geological profile of Bad Ems (based on DENNER 1929, modified).

Die Abteilung Pfungstwiese hat die sog. Pfungstwieser Gänge aufgeschlossen. In Richtung NE und SW sind die Vererzungen durch Störungen begrenzt (EHRENDREICH 1958). Die Erzgänge streichen überwiegend N-S und fallen in Richtung E ein. Die Gänge weisen eine bogenförmige Ausbildung auf. Außerdem sind sie durch weitere Störungen versetzt worden. Bauwürdig waren vor allem Bleiglanz und Zinkblende, lokal kamen auch Kupferkies und Pyrit vor. Gangart waren Quarz und Siderit. Die Gangmächtigkeiten betrugen meist weniger als 1,5 m, erreichten jedoch auch lokal bis 20 m. Die bauwürdige Länge lag meist unter 150 m; Ausnahme war das 5. Mittel mit bis 300 m (EHRENDREICH 1958). Aufgeschlossen war die Lagerstätte durch drei Tiefe Stollen (Alter und Neuer Pfungstwieser Stollen sowie Tiefer Stollen), mehrere Hochbausohlen (z. B. Looser und Pitschbacher Stollen, 3. Hochbausohle) sowie durch drei Tagschächte (Abb. 4) und mehrere Blindschächte. Der Tiefbau ging bis zur 18. Tiefbausohle um.

Weiter in Richtung SW folgt der Fahnenberger Gang mit NE-SW-Streichen und einer Länge von ca. 300 m. Er ist durch zwei Tagschächte und den Tiefen Stollen (97,06 m NN) erschlossen, der bis in das Grubenfeld Pfungstwiese vorgetrieben wurde. Der Abbau erfolgte bis zur 4. Tiefbausohle. Die Grube ist außerdem über einen Blindschacht an die 6. Tiefbausohle angeschlossen, die die Abteilungen Neuhoftung, Fahnenberg und Pfungstwiese miteinander verbindet. Die Mächtigkeit des Erzganges betrug 0,25–5,0 m bei einer bauwürdigen Länge von 160 m. Als Besonderheit erwähnt WENCKENBACH in ODERNHEIMER (1865: 114) ein lokales Vorkommen von „Nickelarsenikglanz“ (Gersdorffit) mit „Schwefelkies“ (Pyrit) und der Gangart Kalkspat.

Den wirtschaftlich bedeutendsten Teil der Lagerstätte stellte der steil einfallende NW-SE-streichende Neuhoftungsgang dar. Aufgeschlossen ist die Lagerstätte über den Stadtstollen (82,48 m NN), den Neuhoftungsstollen (97,06 m NN) sowie den Schacht II (211,37 m NN). Der Tiefbau erfolgte bis zur 15. Tiefbausohle. Des Weiteren verfügt das Bergwerk über einen tiefen Blindschacht (Weidtman-Schacht). Der Neuhoftungsgang führte auf einer Länge von 380 m Erz. Die Gangmächtigkeiten betrugen 8–10 m (teilweise sogar bis 20 m im W), nahmen jedoch bis auf ca. 1 m im E ab. Außerdem wird über eine Abnahme der bauwürdigen Länge mit zunehmender Tiefe berichtet. Die Mineralisation bestand aus derbem Bleiglanz, stellenweise mit Mächtigkeiten von 5 m, daneben kamen Zinkblende und Siderit vor.

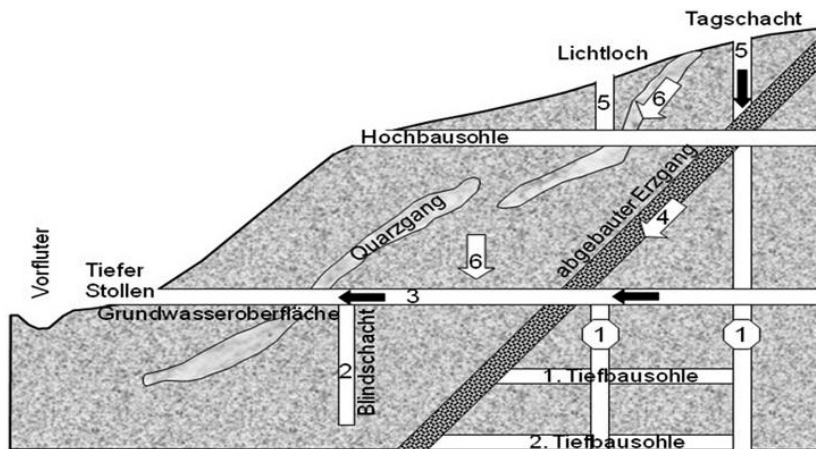
Der Buntmetallerzbergbau im Rheinischen Schiefergebirge wurde überwiegend als Versatzbergbau betrieben. Die rückversetzten Gesteine stammten häufig aus dem Abbau selbst, es waren nicht (ausreichend) erzhaltige Ganggesteine (WIEBER 1999).

4. Hydrogeologie gefluteter Grubenbaue

Durch den Bergbau wurden die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse erheblich verändert. Die hydrothermal gebildeten Erzgänge der deutschen Mittelgebirge fallen meist steil ein. Im Rheinischen Schiefergebirge lassen die verbreit-

teten devonischen Sedimentgesteine nur eine geringe Grundwasserneubildung zu, im Bereich ausbleißender Quarz-/Erzgänge – vor allem nach erfolgtem Abbau – können aber erhebliche Sickerwassermengen zutreten. In den oberen Teufen (Hochbausohlen) wird das „Tagwasser“ über Röschen abgeführt. Auf Vorfluterniveau wurde bei den bedeutenden Gruben ein Wasserlösungs- bzw. Erbstollen angelegt, der die Grubenbaue auf diese Höhenlage entwässerte. Mit dem tieferen Abbau war eine Ableitung des zufließenden Grundwassers in freiem Gefälle nicht mehr möglich. Das Wasser musste nun gefördert werden. Die bedeutenderen Gruben bauten bis in Tiefen von mehreren hundert Metern unter Vorfluterniveau das Erz ab. Während des Bergbaus musste der Grundwasserspiegel entsprechend abgesenkt werden.

Mit der Aufgabe des Bergbaus wurde auch die Wasserhaltung eingestellt und die Gruben wurden geflutet. Der Grundwasserspiegel stellte sich in der Regel auf Erbstollen-/Tiefe-Stollen- bzw. Vorfluterniveau ein, da die Wasserlösungsstollen weiterhin die Grubenbaue entwässern (Abb. 3). Gegenüber der ursprünglichen hydrogeologischen Situation vor Beginn der bergbaulichen Tätigkeit ist der Grundwasserspiegel dementsprechend abgesenkt.



Legende:

Grundwasser:

1. Schachtwasser: in gefluteten Stollen und Schächten zirkulierende Grundwasser.
2. In Blindschächten eingestaute Grundwasser.
3. Über Röschen gefasste Grundwasser [mit (geringem) Tagwasseranteil], die über Röschen nach außen geführt werden.

Tagwasser:

4. Sickerwasser aus Abbaubereichen (ungesättigte Zone).
5. Freie Wasserzutritte aus Schächten und Erzrollen (ungesättigte Zone).
6. Sickerwasser außerhalb der Abbaubereiche (ungesättigte Zone).

Abb. 3: Systemskizze der Hydrogeologie gefluteter Grubenbaue (WIEBER 1999).

Fig. 3: Schematic hydrogeological profile of flooded mines (WIEBER 1999).

waren Thermalwässer in der weiter entfernten Abteilung Pfungstwiese erst auf der 14. Tiefbausohle und zwar nur beim liegenden 5. Mittel (HERBST & MÜLLER 1964) zu beobachten (Abb. 4). Beim Tiefbau der anderen Mittel kam es zu keinen nennenswerten Thermalwasserzutritten. Nach HERBST & MÜLLER (1964) betrug die Wasserhaltung für die gesamte Verbundgrube im Jahresdurchschnitt 10,1 Mio. m³. Die Wasserzuflüsse aus den Abteilungen Neuhoftnung (4,4 Mio. m³/a) und Pfungstwiese (5,2 Mio. m³/a) erreichten – bezogen auf die 11. Tiefbausohle Neuhoftnung – eine ähnliche Größenordnung. Unterhalb der 11. Tiefbausohle Pfungstwiese traten durchschnittlich nur 0,5 Mio. m³/a zu.

Aber auch nach Einstellung der Wasserhaltung stieg der Grundwasserspiegel nicht auf das ursprüngliche Niveau an (Abb. 4), vielmehr durchziehen die Stollen weiterhin das Gebirge wie Dränagen. Der Grundwasserspiegel stellte sich in Höhe des Stadtstollens (82,48 m NN) ein, der in den Emsbach entwässert (Abb. 5). Aktuell entwässert der Stadtstollen (ca. 15 m unterhalb Neuhoftnungsstollenniveau) mit 1,1 Mio. m³/a (VIEHMANN 2007; WIEBER & STREB 2011). Dies entspricht den Angaben zum Wasserhaltungsvolumen bis zur 5. Tiefbausohle Abteilung Neuhoftnung gemäß HERBST & MÜLLER (1964).

Hydraulisch entspricht das geflutete Bergwerk vereinfacht einem System kommunizierender Röhren mit hohen Fließgeschwindigkeiten in den hydraulisch wirksamen Stollen und Schächten (s. o.) Diese hydrogeologische Modellvorstellung wurde durch Messungen der Wasserstände sowie der physiko-chemischen Parameter (Temperatur etc.) im Weidman-Schacht und Schacht 2 (Abteilung Neuhoftnung) sowie im Schacht I und HILLSCHACHT (Abteilung Pfungstwiese) bestätigt. Nicht zugänglich sind die Abteilungen Fahnenberg und Tollgraben. Hydrochemisch unterscheiden sich die auslaufenden Grubenwässer der Abteilung Tollgraben und Neuhoftnung erheblich. Die geringe Mineralisation und Schüttung (ca. 1 l/s) des Tiefen Tollgrabenstollens deuten auf Sickerwasser (unge-sättigte Zone) hin, dies ist aber nicht abschließend geklärt.



Abb. 5: CO₂-Austritte im Weidman-Schacht, Abteilung Neuhoftnung, Grube Mercur und Grubenwassereinleitung.

Fig. 5: Mercur Mine, Neuhoftnung section: CO₂ outgassing in Weidman Shaft and mine dewatering.



Abb. 6: Thermalwasserzutritte auf der 8. Tiefbausohle auf der Grube Mercur, Abteilung Neuhoﬀnung (Foto Bergbaumuseum Bad Ems).

Fig. 6: Emerging thermal water on the 8th floor of Mercur Mine, Neuhoﬀnung section (photo Bergbaumuseum Bad Ems)

Um weitergehende Anhaltspunkte zur Grundwasserhydraulik zu gewinnen, wurden Tiefenmessungen der Temperatur und elektrischen Leitfähigkeit im Weidman-Schacht, Abteilung Neuhoﬀnung der Grube Mercur, durchgeführt (Abb. 7). Die Stichtagsmessungen zeigen nur geringe Differenzen bei den Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen über eine Teufe von ca. 550 m. Bei der Stichtagsmessung am 17.07.2008 nahm die Temperatur bis ca. 180 m Teufe nur gering zu, danach ist ein etwas höherer Gradient bis zur Endteufe festzustellen (Abb. 7). Dies kann durch Zufluss geringfügig kühlerer Grundwässer aus der Abteilung Pﬂingstwieße erklärt werden, doch lässt sich dies über Messungen in den Schächten der Abteilung Pﬂingstwieße nicht sicher belegen (Tab. 2). Die geringen Temperaturdifferenzen lassen sich auf schnelle Aufstiegs-/Fließgeschwindigkeiten sowie Konvektion zurückführen (WIEBER 1999).

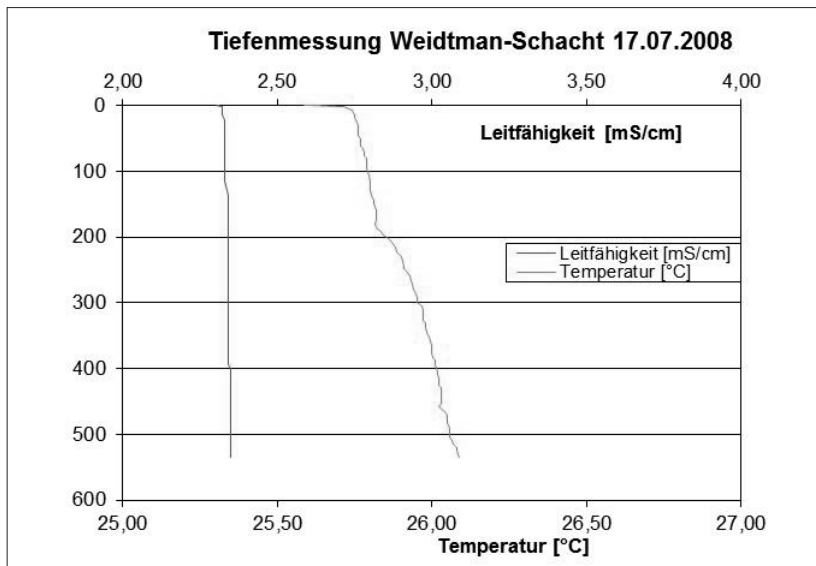


Abb. 7: Temperatur- und Leitfähigkeitsprofil des Weidtmann-Schachts, Bad Ems.

Fig. 7: Weidtmann-Schacht, Bad Ems: depth profile of temperature and electrical conductivity.

6. Hydrochemische Beschaffenheit der Grubenwässer

Hydrochemische Untersuchungen auf die vor-Ort-Parameter, Hauptkationen und -anionen sowie Spurenelemente wurden mehrfach in den Grubenwässern der Abteilung Neuhoftung durchgeführt. In den Schächten der Abteilung Pflingst- wiese erfolgte nur eine einmalige Messung am 23.06.2007 (Tab. 2). Neben den in den Schächten zirkulierenden Wässern sind Analysen der über den Tollgraben- stollen auslaufenden Grubenwässer sowie – als Beispiel für die Emser Thermen – das Thermalwasser der Römer-Quelle in Bad Ems dargestellt. Die hydrochemische Grundwasserbeschaffenheit in den untersuchten Bergwerksschächten ist unmittelbar vergleichbar. Es wurden hoch mineralisierte, schwach saure Thermal- wässer mit Temperaturen um 24 °C vorgefunden. Die Sauerstoffgehalte (<2,5 mg/l) und Redox-Potentiale (<250 mV) sind gering; dies gibt Hinweise auf größere Zirkulationstiefen.

Demgegenüber sind die aus dem Tiefen Tollgrabenstollen auslaufenden Wäs- ser gering mineralisiert und weisen neutrale pH-Werte sowie höhere Sauerstoff- gehalte auf. Die Temperatur ist mit 15 °C gegenüber oberflächennahen Grund- wässern etwas erhöht. Demgegenüber sind die Wässer der Römer-Quelle stark mineralisiert (Tab. 2) und weisen Temperaturen von 46,2 °C auf. Das Redox-

Tab. 2: Hydrochemische Beschaffenheit der Grubenwässer der Grube Mercur.

Tab. 2: Hydrochemical composition of mine water of Mercur Mine.

						Tollgraben	Emser Therme**
	Hill- schacht	Schacht I	Weidtman- Schacht	Schacht II	Bergerolle	Tiefer Stollen	Römer- quelle
Datum	23.06.2007	23.06.2007	02.03.2007	25.11.2006	25.11.2006	Juli 1998	25.06.1997
Teufe	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche (Hahn)
Temp. [°C]	24,0	24,2	24,6	23,3	24,0	15,1	46,2
Elektr. Lf. [µS/cm]	2.230	2.200	2.240	2.230	2.350	438	5.200 (46 °C)
pH-Wert	6,02	6,05	6,11	6,31	6,40	7,20	6,44
O ₂ [mg/l]	0,69	0,83	2,33	1,02	<2,0	7,50	0,40
Red-Pot. [mV]*	250	244	231	246	248	401	137
Ks _{4,3} [mmol/l]	22,2	21,2	23,0	22,5	21,0	2,1	29,4
Ca [mg/l]	110	109	133	124	124	38	53,7
Mg [mg/l]	45,5	45,7	50,2	49,9	63,4	18,0	32,4
Na [mg/l]	371	372	316	344	338	2,0	921
K [mg/l]	8,39	8,21	9,04	20,9	23,7	6,3	19,4
F [mg/l]	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	2,48	2,52	0,24	1,10
Cl [mg/l]	80,5	79,7	85,8	92,2	94,6	6,9	574
SO ₄ [mg/l]	41,4	38,2	89,6	72,5	74,2	64,0	22,0
HCO ₃ [mg/l]	1.354	1.293	1.403	1.373	1.281	127	1.793
NO ₃ [mg/l]	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	0,5	1,0	0,79	<0,3
Al [µg/l]	n.b.	n.b.	<80	<80	<80	110	n.b.
As [µg/l]	<30	<30	34	100	68,9	<1,0	4,0
Cd [µg/l]	<1,0	<1,0	<0,06	0,24	0,43	<0,5	<0,5
Cu [µg/l]	<10	<10	2,0	5,0	2,0	14	21
Fe _{ges.} [µg/l]	1.550	261	2.995	4.690	6.190	1.000	1.100
Hg [µg/l]	<5,0	<5,0	<0,5	<0,5	<0,5	n.b.	<0,1
Mn [µg/l]	1.700	1.320	1.490	1.315	1.552	14	n.b.
Ni [µg/l]	60	49	13	105	13	14	<2,0
Pb [µg/l]	31	<10	<0,15	0,15	0,72	15	<2,0
Zn [µg/l]	701	413	623	735	1.145	49	<5,0
Summe Kationen [mmol(eq)/l]	25,62	25,66	25,04	25,86	26,78	3,89	45,4
Summe Anionen [mmol(eq)/l]	25,33	24,24	27,30	26,75	25,36	3,62	46,0

u.d.B. = unter der Bestimmungsgrenze

n.b. = nicht bestimmt;

* korrigiert auf Standard-Wasserstoffelektrode

** aus LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1998)

Potential beträgt 137 mV; Sauerstoff wurde nur in Spuren festgestellt (LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1998).

Bei den Spurenelementen der Thermalwässer sowie in den Wässern des Tiefen Stollens Tollgraben sind die Fe-Gehalte mit ca. 1 mg/l erhöht (Tab. 2). Im Tiefen Stollen Tollgraben wurden außerdem Cu, Mn, Ni, Pb und Zn mit geringen Gehalten nachgewiesen. Die in den Schächten zirkulierenden Grubenwässer sowie die Thermalwässer werden hydrochemisch durch Na (bei den Kationen) dominiert, bei den Anionen herrscht Hydrogencarbonat vor (Abb. 8). Bei den Spurenelementen der Grubenwässer (Schächte) fallen erhöhte Gehalte an Fe, Mn und Zn auf (Tab. 2). Die Konzentrationen an As, Ni und Pb sind für ein Erzbergwerk moderat erhöht (Tab. 2), wobei sich die erhöhten As-Gehalte auf eine geogene Arsenmineralisation in dem Fahnenberger Mittel (ODERNHEIMER 1865) zurückführen lassen.

Isotopenuntersuchungen von PORR (2011) weisen die Grubenwässer des Schachts II als Mischwasser mit einem hohen Tritium-freien Anteil (Alter >50 a) und Beimischung von rezentem Wasser (12–21 %) aus. Der „alte“ Anteil lässt sich auf den Zutritt der Emser Thermalwässer zurückführen.

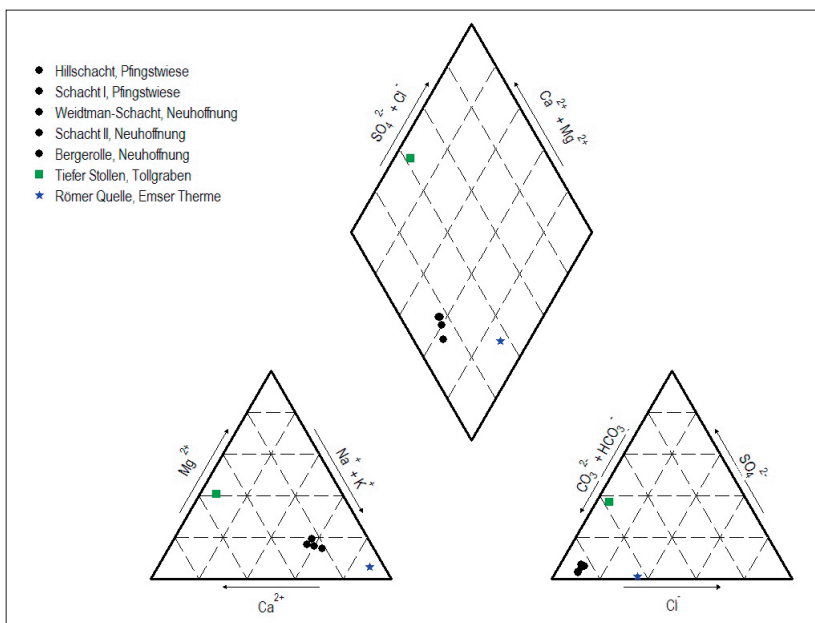


Abb. 8: PIPER-Diagramm der Thermal- und Grubenwässer von Bad Ems ($c_{eq}\%$).

Fig. 8: PIPER diagram of thermal water and mine water of Bad Ems ($c_{eq}\%$).

7. Geothermischer Wärmefluss und Nutzungsmöglichkeiten

Wärme kann sowohl über das feste Gestein als konduktiver Anteil (Wärmeleitung) des Wärmestroms als auch als massegestützter Transport in und über Flüssigkeiten als konvektiver Anteil (Konvektion) des Wärmestroms geleitet werden (KALTSCHMITT et al. 1999). Die Wärmeleitung stellt nach BAEHR & STEPHAN (2006) einen Energietransport zwischen benachbarten Molekülen auf Grund eines im Material vorhandenen Temperaturunterschiedes dar. In Festkörpern ist Wärmeleitung der einzige Energietransport, während es bei Gasen und Flüssigkeiten noch zu Konvektion und Wärmestrahlung kommen kann (BAEHR & STEPHAN 2006).

Die terrestrische Wärmestromdichte setzt sich aus einem konduktiven und einem konvektiven Anteil des Wärmestroms sowie der entlang der Tiefe aufsummierten Wärmeproduktion zusammen. In der kontinentalen Kruste dominiert der konduktive Anteil der Wärmestromdichte (KALTSCHMITT et al. 1999; CLAUSER 2009) und ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$q_{\text{kond}} = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta Z}$$

mit:

q_{kond} = konduktiver Anteil des Wärmestroms [W/m²] λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

ΔT Temperaturgradient [K] ΔZ Schichtmächtigkeit [m]

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine spezifische Materialeigenschaft. Für ausgewählte Stoffe ist sie in Tab. 3 zusammengestellt. Durch die makroskopische Bewegung von Fluiden kann Energie transportiert werden. Auf Grund eines Temperaturgradienten fließen Wärme und Energie als Enthalpie und kinetische Energie des Fluids und durchströmen eine (gedachte) Fläche. Dieser Prozess wird als Konvektion bezeichnet und kann nach dem Gesetz von FOURIER für den Grenzübergang zwischen Wand und Fluid beschrieben werden.

Die Gesamtteufe von Schacht 2 Abteilung Neuhoftnung beträgt ca. 900 m. Berechnet mit einem geothermischen Gradienten von 3 °C/100 m sowie einer oberflächennahen Grundwassertemperatur von 10 °C – ohne erhöhte geothermische Gradienten – sind bei der Endteufe von 900 m überschlägig Temperaturen

Tab. 3: Wärmeleitfähigkeiten ausgewählter Materialien (bei 20 °C und 100 kPa).

Tab. 3: Heat conductivities of selected materials (at 20 °C and 100 kPa).

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] (typischer Rechenwert)
Wasser	0,598*	Sandstein	2,3**
Luft	0,0257*	Tonstein	2,2**

*nach BAEHR & STEPHAN (2006)

**nach VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2000)

von 37 °C zu erwarten. Angetroffen wurden jedoch in der Abteilung Neuhoﬀnung ab der 8. Tiefbausohle (Flurabstand ca. 450 m) Thermalwässer mit 48 °C im Mittel (HERBST & MÜLLER 1964). Bei einem normalen geothermischen Gradienten sind bei diesem Flurabstand Temperaturen von ca. 24 °C anzutreffen.

Der Tiefe Stollen der Abteilung Neuhoﬀnung (Stadtstollen) entwässert das Grundwasser des gefluteten Bergwerks in freiem Gefälle mit einer kontinuierlichen Schüttung von 35 l/s und einer Temperatur von ca. 25 °C. Darüber hinaus ist in den gefluteten Bergwerksanlagen ein Volumen an warmem Grundwasser von ca. 0,9–1,4 Mio. m³ eingestaut (VIEHMANN 2007).

Die vorhandenen Temperaturen sind zur direkten Nutzung zu Heizzwecken nicht ausreichend. Sie können jedoch mit Hilfe der Wärmepumpentechnologie auf ein höheres Temperaturniveau angehoben werden. Überwiegend kommen dabei Kompressionswärmepumpen zum Einsatz, wobei ein Arbeitsmittel verdichtet und somit erwärmt wird. Die Wärmemittel ändern bei Aufnahme bzw. Abgabe von Wärmeenergie ihren Aggregatzustand (flüssig/gasförmig). Die mit dieser Technologie gewonnene Energie (Verdampferleistung) besteht aus der Geoenergie „Grubenwasser“ sowie der Antriebsenergie der Wärmepumpe. Das Grubenwasser der Grube Mercur bietet ideale Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung, da die Temperatur mit kontinuierlich 25 °C sehr hoch ist und so eine eﬀektive Ausbeute ermöglicht, da die Temperaturdiﬀerenz zwischen Wärmequelle und Verbraucher gering ist. So lassen sich Jahresarbeitszahlen (JAZ) von etwa 5 erreichen, d.h. es wird das Fünffache der eingesetzten elektrischen Energie als Wärmeenergie abgegeben.

Bei der geothermischen Nutzung des Grubenwässer für Wärmepumpenanlagen lassen sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten unterscheiden:

- Nutzung der frei auslaufenden Grubenwässer im Tiefen Stollen und
- Nutzung der Wärmeenergie in den gefluteten Grubenbauen (z. B. Schächten).

Gemäß VIEHMANN (2007) benötigen Wärmepumpenanlagen eine Wassermenge von 0,25–0,3 m³/h für 1 kW Verdampferleistung bei einer Temperaturdiﬀerenz von 3 K. Dies entspricht einer Wassermenge von 0,228 l/s bei einer Temperaturdiﬀerenz von 1 K. Die extrahierbare Wärme/Verdampferleistung ($W_{\text{thermisch}}$) lässt sich bei der Wärmekapazität von Wasser [4.200 J/(kg * K)] für eine frei auslaufende Wassermenge (Q) von 35 l/s und einer Temperaturabsenkung von 24 °C auf 4 °C (ΔT : 20 °C) berechnen:

$$\text{Extrahierbare Wärme} = \text{Wärmekapazität} * \Delta T * Q$$

Das geothermische Potential der frei auslaufenden Wässer beträgt unter den genannten Randbedingungen rund 3.000 kW. Diese geothermische Energie entspricht dem Wärmebedarf von ca. 300 modernen Einfamilienhäusern, wobei die geothermische Energie in freiem Gefälle aus dem Bergwerk geliefert wird. Lediglich für den Betrieb der Wärmepumpe wird elektrische Energie (etwa ein Fünftel der Energieausbeute) benötigt. Durch die Nutzung der auslaufenden Wässer kommt es zu keinen Änderungen im System „Bergwerk“.

In den Gesteinen des Bergwerks ist – gegenüber dem auslaufenden Grundwasser – ein Vielfaches an geothermischer Energie gespeichert. Bei einer weitergehenden Nutzung müsste die Energie jedoch technisch durch Abpumpen oder Abkühlung des eingestauten Grubenwassers/Gesteinskörpers entzogen werden. Dies setzt wiederum einen größeren technischen Aufwand und Energieverbrauch voraus.

Schriften

- BAEHR, H. D. & STEPHAN, K. (2006): Wärme- und Stoffübertragung. – 757 S.; Berlin – Heidelberg – New York (Springer).
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Geologie, Chemismus, Genese. – XXIV + 643 S.; Stuttgart (Wiss. Verlagsges.).
- CLAUSER, C. (2009): Heat Transport Processes in the Earth's Crust. – Surveys in Geophysics, 30: 163-191; Berlin – Heidelberg – New York.
- DENNER, J. (1929): Gutachten über die Heilquellen zu Bad Ems. – In: Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivelements (Hrsg.): Beiheft zum Gutachten über die Heilquellen zu Bad Ems, S. 1–32; Mainz.
- DENNER, J. (1956): Geologie der Emser Thermen und die Emser Quellen-Bergwerksfrage. – Sonderdruck aus Heilbad und Kurbad, 8 (Nr. 6): 20 S.; Gütersloh.
- EHRENDREICH, H. (1958): Stratigraphie, Tektonik und Gangbildung im Gebiet der Emser Blei-Zinkerzgänge. – Z. dt. geol. Ges., 110: 561–582; Hannover.
- HERBST, F. & MÜLLER, H.-G. [1964]: Raum und Bedeutung des Emser Gangzuges. – 39 S., Anh.; Bad Ems.
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E. & WOLFF, H. (Hrsg.) (1999): Energie aus Erdwärme – Geologie, Technik und Energiewirtschaft. – 265 S.; Stuttgart (Dt. Verlag für Grundstoffindustrie).
- KAYSER, E. (1892): Erl. geol. Specialkt. Preussen u. d. Thüring. Staaten [1:25.000], Bl. [5612] Ems. – 42 S.; Berlin.
- KOCH, C. (1881): Ueber die Gliederung der rheinischen Unterdevon-Schichten zwischen Taunus und Westerwald. – Jb. Kgl. Preuss. geol. Landesanst. Bergakademie Berlin, 1880: 190–242; Berlin.
- LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1998): Die Heilquellen des rheinland-pfälzischen Staatsbades Bad Ems – Fakten und Daten im Überblick. – 128 S.; Mainz.
- MITTMAYER, H. G. (2008): Unterdevon der Mittelrheinischen und Eifeler Typ-Gebiete (Teile von Eifel, Westerwald, Hunsrück und Taunus) – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland VIII. Devon, SDGG, H. 52: 139–203; Hannover.
- ODERNHEIMER, F. (Hrsg.) (1865): Das Berg- und Hüttenwesen im Herzogthum Nassau. Erster Band. – IV + 474 S.; Wiesbaden (Kreidel).
- PORR, S. (2011): Hydrogeologie ausgewählter gefluteter Gruben im Siegerland-Wied-Distrikt. – Dipl.-Arb. Geol. Inst. Univ. Mainz, 190 S.; Mainz.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2000): Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. – VDI 4640, Blatt 1: 32 S.; Düsseldorf.
- VEIHMANN, C. (2007): Hydrogeologie im Gebiet von Bad Ems/Lahn und Möglichkeiten zur Nutzung des geothermischen Potentials. – Dipl.-Arb. Weiterbildender Fernstudiengang Angewandte Umweltwissenschaften Univ. Koblenz-Landau, 138 S.; Koblenz.

- WIEBER, G. (1999): Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilbererzbergbaus am Beispiel des westlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Saar-Nahe-Senke. – Habil.-Arb. Geol. Inst. Univ. Gießen, 250 S.; Gießen.
- WIEBER, G. (2005): Die Geologie des Emser Gangzuges. – Bad Emser Hefte, 244: 42 S.; Bad Ems.
- WIEBER, G. & PAHL, G. (2006): Zur Geologie des Geilnauers Mineralwassers. – Heimatjahrbuch des Rhein-Lahn-Kreises, 2006: 79–83; Bad Ems.
- WIEBER, G. & STREB, C. (2011): Hydrochemistry and mine water of flooded mines: Case studies from the Rhenish Massif, Germany. – In: RÜDE, T., FREUND, A. & WOLKERSDORFER, C. (Hrsg.) (2011): Proceedings of the 11th Congress of IMWA, S. 633–637; Aachen.
- WIEBER, G. & STREB, C. (2012): Geothermische Nutzung gefluteter Grubenbaue – Variantenstudie für das Grubenfeld Margarethe I des Florz-Füsseberger Gangzuges. – 56 S.; Bingen (unveröff.).
- WOLKERSDORFER, C. (2002): Mine Water Tracing. – Geol. Soc. London Spec. Publ., 198: 47–61; London.
- WOLKERSDORFER, C. (2006): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. – Habil.-Arb. Inst. f. Geowiss., Geotech. u. Bergbau TU Bergakademie Freiberg, 465 S.; Berlin – Heidelberg – New York (Springer).

Manuskript-Eingang: 24.06.2013

Annahme zum Druck: 09.07.2013