

Zur Hydrogeologie der Mofetten sowie Thermal- und Mineralwässer an der Unteren Lahn, Rheinisches Schiefergebirge

GEORG H.E. WIEBER

Kurzfassung: Im Unteren Lahntal sind hoch mineralisierte CO₂-führende Thermalwässer verbreitet, die durch Brunnen und den ehemaligen Erzbergbau erschlossen wurden. Diese Tiefenwässer unterscheiden sich chemisch deutlich von oberflächennahen Grundwässern durch eine signifikant höhere Mineralisation mit hohen Natrium- und Chloridgehalten. Die Anionen werden durch Hydrogencarbonat dominiert. Die Thermalwasservorkommen konzentrieren sich entlang von Sattelstrukturen insbesondere auf Gebiete, in denen die spröden Emsquarzite in der Sattelachse durch das Einschneiden von Lahn und Rhein freigelegt wurden. Auch durch den bedeutenden Erzbergbau auf dem Emser Gangzug (Erzsattel) wurden hoch mineralisierte Thermen angetroffen, die sich auch nach Flutung der Bergwerke durch erhöhte Wassertemperaturen und durch ihre hydrochemische Beschaffenheit nachweisen lassen. Die hohen Heliumgehalte in der Gasphase deuten auf den Aufstieg aus großer Tiefe hin. Dagegen sind hohe Radonkonzentrationen auf nahe Quellen oder schnelle Aufstiegs geschwindigkeiten zurückzuführen.

Abstract: In the lower Lahn valley highly mineralized CO₂-bearing thermal waters tapped by water wells and former ore mining activities are widespread. These deep waters differ clearly from shallow ground water in their physical and chemical parameters due to a significantly higher mineralization of sodium and chloride. The dominant anion species is hydrogen carbonate. Thermal water reservoirs are mainly located along anticlinal axes, especially in areas where brittle Ems quartzite is exposed by the rivers Lahn and Rhine. Highly mineralized thermal springs were also tapped by extensive former underground ore mining activities within the Ems vein system (Erzsattel) and can still be detected by increased water temperature and the hydrochemical properties even after the mine drainage has been shut down. High helium contents indicate an uprise from greater depths (earth's mantle). High radon contents can be attributed to nearby sources or fast fluid uprise.

1. Einleitung

Im Lahnggebiet gibt es einige wirtschaftlich bedeutende Mineral- und Thermalwasservorkommen. Zwischen Lahnstein und Dausenau sind zudem CO₂-Austritte in der Lahn bekannt, die von WAGNER (2018) kartiert wurden. Sie waren bereits vor ca. 90 Jahren Gegenstand hydrogeologischer Untersuchungen im Rahmen des sogenannten Emser Bergbau-Quellenstreites (BOETTICHER, 1929; DENNER 1956).

Die wichtigsten Mineralwässer befinden sich in Oberlahnstein (Victoria Brunnen), in Bad Ems (Emser Thermen), bei Geilnau und bei Fachingen (Fachinger Sprudel). Außerdem treten sie an mehreren Stellen in sogenannten Sauerbrunnen zutage, von denen allerdings nur wenige genutzt werden. Beispiele befinden sich bei Nastätten, im Sauerthal, bei Holzhausen sowie in Lahnstein und Braubach (SARHOLZ, 1987). Bereits 1847 schrieb SANDBERGER, dass sich die Mineralwasservorkommen in Züge gliedern lassen. Im Zuge dieser Arbeit wird die Hydrogeologie der Tiefenwässer incl. der Verbreitung von Mofetten im Gebiet der Unteren Lahn untersucht. Der Begriff „Tiefengrundwässer“ wird im Rahmen dieser Veröffentlichung als Oberbegriff für in tieferen geologischen Formationen zirkulierende Grundwässer verwandt, die über Brunnen gefasst oder frei zutage treten. Sie werden zum Teil als Mineral-, Thermal- und Heilwasser verwendet.

2. Durchgeführte Untersuchungen und Untersuchungsmethoden

Gegenstand dieser Arbeit sind die hydrogeologischen Verhältnisse der tieferen Grundwässer an der Unteren Lahn zwischen Dausenau und Lahnstein. Durch den Bearbeiter wurden in den letzten Jahren umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen im Projektgebiet durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden. Außerdem wurden von SCHREIBER et al. (2012) die Gasphasen in Mofetten der Lahn und angrenzenden CO₂-führenden Quellen und Sauerwässern untersucht. Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die tektonischen Strukturen mitberücksichtigt, da sie wertvolle Hinweise zur Interpretation der Hydraulik von Tiefengrund- und Mineral-/Thermalwässern sowie Gasen liefern.

3. Geologische Verhältnisse

Das untersuchte Gebiet der Unteren Lahn umfasst Teilgebiete der Geologischen Karten GK 5611 (Koblenz) und 5612 (Bad Ems). Geologische Kartierungen des Blattes 5612 erfolgten durch KAYSER (1892) sowie GAD (in Vorbereitung), die geologische Aufnahme des Blattes GK 5611 Koblenz durch GAD et al. (2007), SCHMIERER (1934), KAYSER (1891). Weitere wichtige Grundlagen sind darüber hinaus die Forschungsergebnisse von EHRENDREICH (1958) zur Stratigraphie und Tektonik des Gebietes sowie die hydrogeologischen Untersuchungen zum Emser Bergbau-Quellenstreit (BOETTICHER, 1929 und DENNER, 1956).

Vor etwa 400 Millionen Jahren befand sich hier ein Meerestrog (Schelfbereich von Laurussia, Rhenoherynisches Becken), der sich quer durch Europa zog. Hierin sammelte sich der durch Flüsse ins Meer transportierte Abtragungsschutt des angrenzenden Festlandes. In der Folgezeit wurde durch Plattenbewegungen der Meeresraum und mit ihm die darin sedimentierten Ablagerungen zusammengeschoben und die Ozeane geschlossen (variszische Orogenese). Dies führte zu mächtigen Sedimentstapeln, die gefaltet, gegeneinander verschoben und übereinander geschoben sowie schwach metamorph überprägt wurden.

Tab. 1: Stratigraphische Gliederung des Oberemsiums an der Unteren Lahn.

Stufe	Unterstufe (MITTMAYER (2008))	Gliederung (EHRENDREICH, 1958)	Mächtigkeit (m)
Oberes Emsium	Kondel	Kieselgallenschiefer	bis 300
		Flaserschiefer	ca. 100
	Laubach	Laubacher Schichten	ca. 200
	Lahnstein	Hohenrheiner Schichten	bis 250
		Emsquarzit	120-140

Das bearbeitete Gebiet befindet sich in der tektonischen Großstruktur der Mosel–Dill–Mulde (REQUADT, 1991). Die Untere Lahn mit ihrem Ost–West–Verlauf stellt die geographische Grenze zwischen dem Taunus im Süden und dem Westerwald im Norden dar. In die Höhenzüge der genannten Mittelgebirge sind zahlreiche kleinere Bäche eingeschnitten, die meist zur Lahn hin entwässern. Taunus und Westerwald sind Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Geologisch besteht

das Gebiet überwiegend aus schwach metamorph überprägten Gesteinen des Devons. An der Unteren Lahn sind Gesteine des Oberemsum verbreitet (Tab. 1). Vom Liegenden (Emsquarzit) zum Hangenden (Kieselgallenschiefer) nimmt der Feinkornanteil in den Sedimentgesteinen zu.

Nach DENNER (1956) und EHRENDREICH (1958) besteht das geologische Profil des Untere Lahn-Gebietes von Westen (Lahnstein) nach Osten (Dausenau) vereinfacht aus folgenden tektonisch-geologischen Einheiten: Oberlahnsteiner Sattel – Eisenbacher Mulde – Erz - bzw. Blöskopfsattel – Trümmermulde – Klopp- und Emser Quellensattel – Emser Mulde (Abb. 1 und 2). Westlich des Oberlahnsteiner Sattels schließen die Ober- und die Niederlahnsteiner Störung (ELKHOLY & KRÖLL, 1998) an. Weiter im Westen befindet sich der Niederlahnsteiner Sattel.

Die anstehenden Festgesteine sind der geologischen Zeiteinheit des Emsium (Oberstes Unterdevon, ca. 395 Mio. Jahre vor heute) zuzuordnen. Zwischen dem Quellensattel und der Niederlahnsteiner Störung sind die Gesteine durch zahlreiche geologische Störungen und Spezialfalten gegeneinander versetzt und verschoben. Ein einfacheres tektonisches Bild zeigt sich insbesondere an der Ostflanke des Quellensattels, wo die Gesteine gleichmäßig in Richtung Osten einfallen.

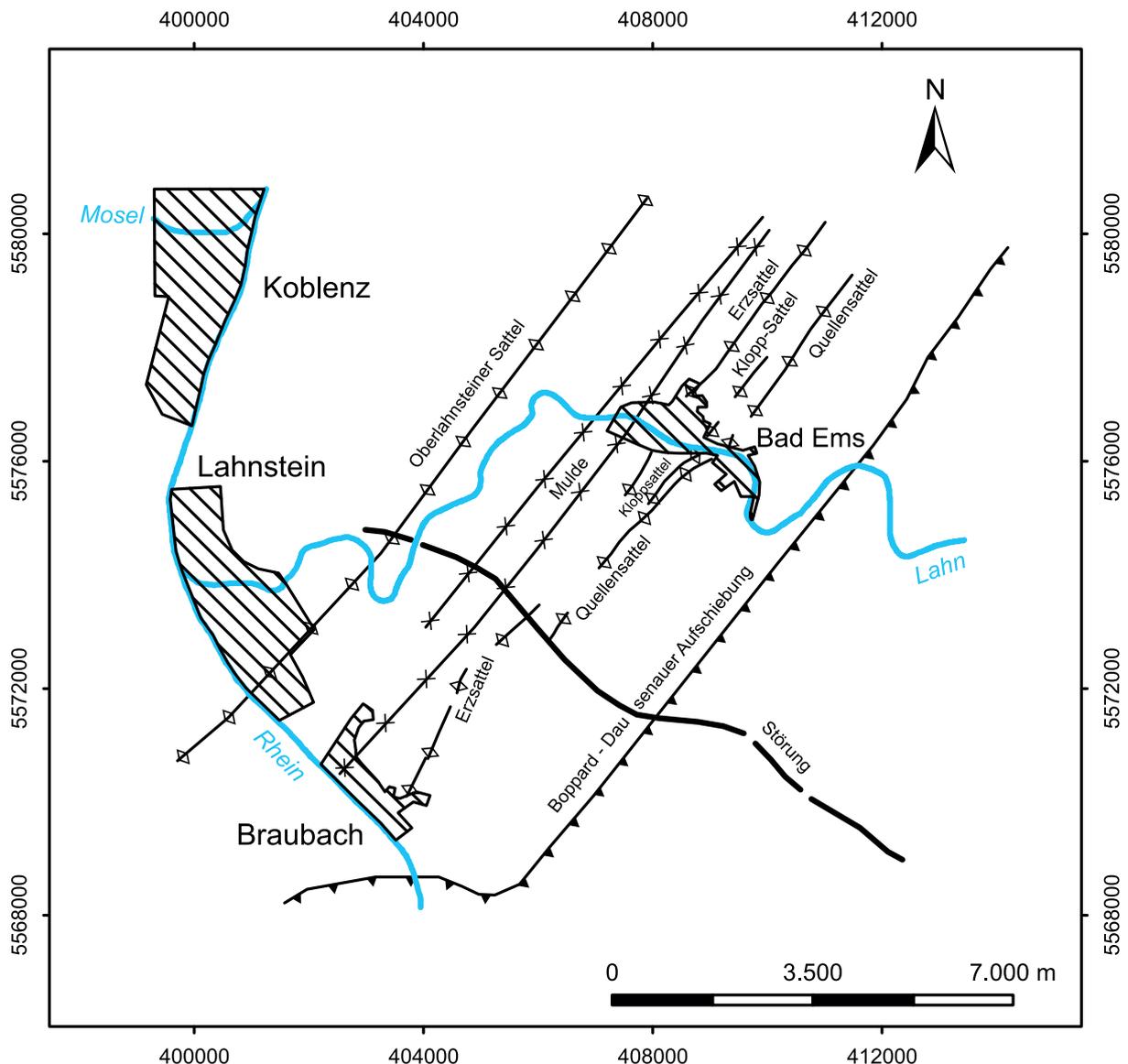


Abb. 1: Geotektonische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes (verändert nach HERBST & MÜLLER (1964) und EHRENDREICH (1958).

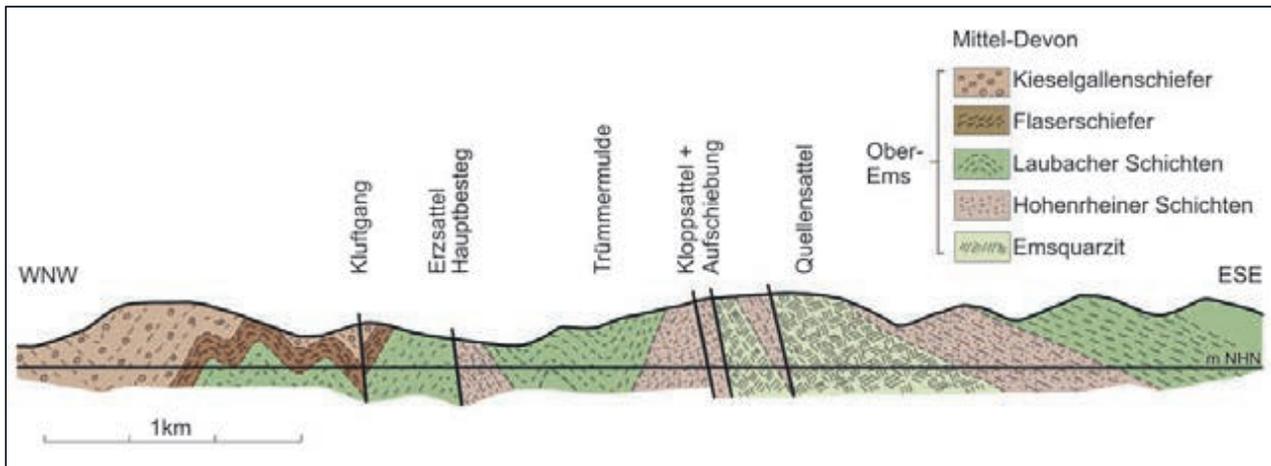


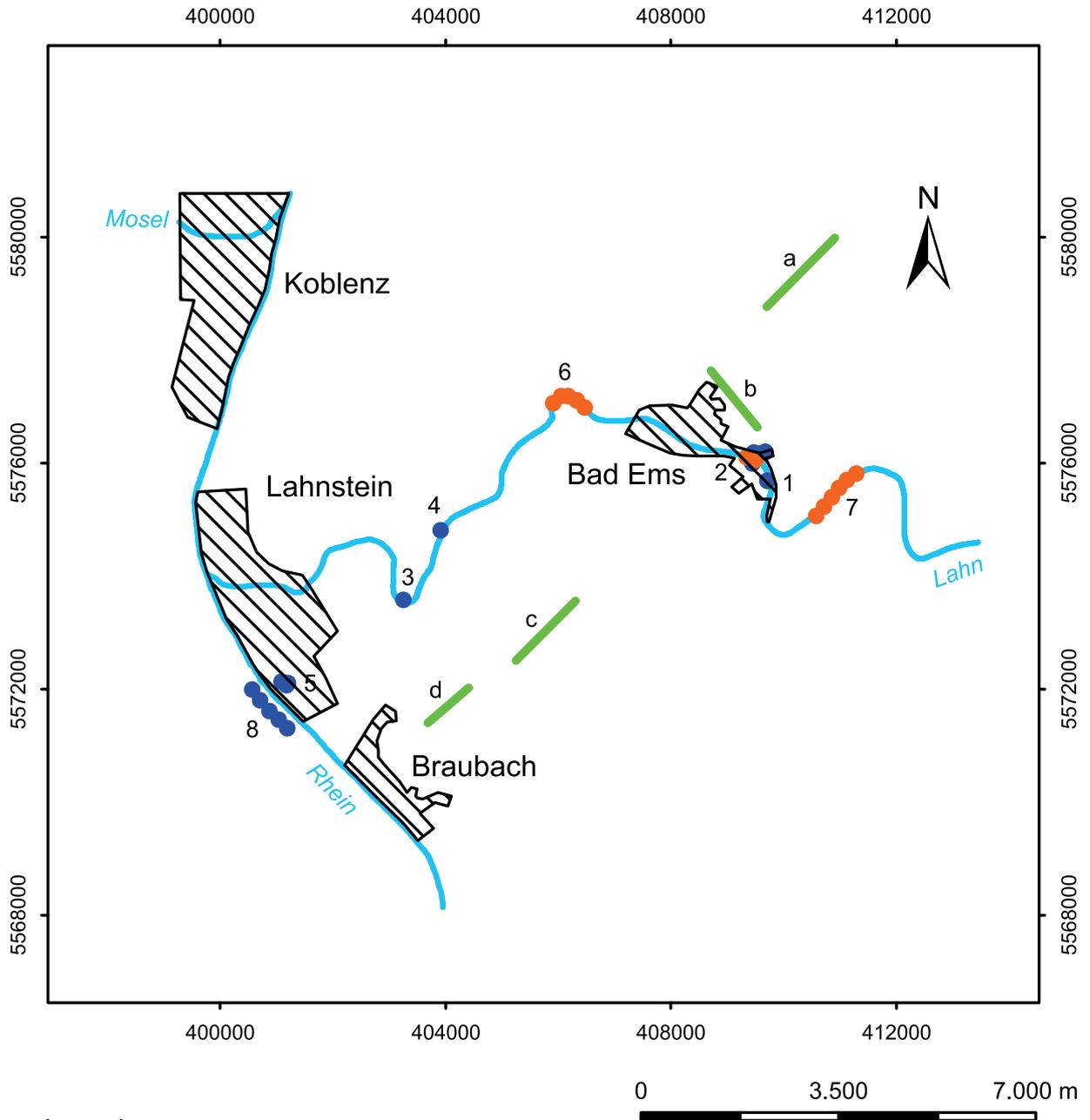
Abb. 2: Geologisches Querprofil „Untere Lahn“ (Grundlage EHRENDREICH, 1958)

Hydrogeologisch stellen die devonischen Sedimentgesteine Kluftgrundwasserleiter mit unterschiedlichen Gebirgsdurchlässigkeiten und Speichervermögen dar. Während die schwach metamorph überprägten Ton- und Siltsteine nur von untergeordneter Bedeutung für die Wassergewinnung sind, weisen die quarzitischen Sandsteine – insbesondere in tektonisch bedingten Auflockerungszonen – (Mineral-)Wasservorkommen überregionaler Bedeutung auf. Besondere Bedeutung kommt geologischen Sattelstrukturen zu. In bei der Faltung spröde reagierenden Gesteinen (z.B. Emsquarzit) rissen Klüfte auf, die durch Fächerstellung in den Sattelachsen erhebliche Gebirgsdurchlässigkeiten besitzen können. Das Grundwasser des Gebirges ist hydraulisch an die Lahn angeschlossen, die durch den tiefsten Erosionsanschnitt die Vorflut übernimmt.

Weitere Aufschlüsse von CO_2 -führenden Tiefenwässern erfolgten durch den ehemals bedeutenden Erzbergbau an der Unteren Lahn mit Teufen von über 1.000 m. Nach Flutung der Bergwerke entgasen diese Grubenwässer in Schächten zum Teil deutlich sichtbar. Sie werden über Tiefe Stollen in die Vorfluter abgeleitet.

4. Tiefen-, Mineral- und Thermalwässer an der Unteren Lahn

Mineral- und Thermalwässer unterscheiden sich von „normalen“ oberflächennahen Grundwässern durch erhöhte Gehalte an gelösten Stoffen beziehungsweise durch erhöhte Temperaturen. HINTZ & GRÜNHUT (1916) legten bei Mineralwässern die Untergrenze für gelöste feste Bestandteile bei 1000 mg/kg Wasser und für die Mindesttemperatur von Thermalwässern bei 20°C fest. Heute dürfen auch geringer mineralisierte Wässer als Mineralwässer bezeichnet werden. Als Sauerlinge gelten Wässer, die einen CO_2 -Gehalt von mindestens 250 mg/l aufweisen (HÖLTING & COLDEWEY, 2009). Das Zutagetreten von Mineral- und Thermalwässern ist an bestimmte geologische Strukturen und tektonische Bauelemente gebunden. Nur in Ausnahmefällen nehmen die Mineral- und Thermalwässer an kurzzeitigen Wasserkreisläufen teil. Häufiger handelt es sich um Wässer tiefer Zirkulationssysteme, deren Stoffaustausch auf hydrothermale Aktivitäten zurückzuführen ist. Andere Thermalwässer sind mit rezemem Magmatismus oder mit Zutritten von Kohlensäure aus dem Erdmantel in Verbindung zu bringen (MICHEL, 1997). Die erfassten Wasservorkommen sind in Abb. 3 dargestellt.



Legende

- 1 Emser Thermalwässer
- 2 Mofetten in der Lahn
- 3 Quelle bei der Ahler Hütte
- 4 Quelle bei Miellen
- 5 Victoria Brunnen, Lahnstein
- 6 Mofetten in der Lahn
- 7 Mofetten in der Lahn
- 8 Rhenser Brunnen
- a Grube Mercur, Abt. Pfingswiese
- b Grube Mercur, Abt. Neuhoftung
- c Grube Friedrichsegen
- d Grube Rosenberg

Abb. 3: Lageplan der erfassten Kohlensäure führenden Thermal- und Grubenwasservorkommen sowie Mofetten.

Die erfassten Tiefenwasseraufschlüsse folgen dem Streichen tektonischer Strukturen (Abb. 1 und 3). Von Westen in Richtung Osten besteht folgende Zuordnung:

Im Streichen des **Oberlahnsteiner Sattels**:

- Mineralwasservorkommen im Mittelrheintal bei Rhens (linksrheinisch): Rhenser Mineralwasser,
- Mineralwasservorkommen im Mittelrheintal bei Lahnstein (rechtsrheinisch): Victoriasprudel,
- Säuerling von Miellen (untere Lahntal),
- Säuerling von Hof Ahl (untere Lahntal),

Im Streichen des **Erzsattels**:

- Zutritte hoch mineralisierter Wässer auf den Tiefbausohlen der Gruben Mercur (Bad Ems), Friedrichsseggen (Lahnstein) sowie Rosenberg bei Braubach (DENNER, 1956).

Im Streichen des **Emser Quellensattels**:

- 29 bekannte Mineralquellen im Stadtgebiet von Bad Ems (nur z.T. in Nutzung).

Dausenau:

- Mineralwasseraustritte in der Lahn unterhalb der Staustufe Dausenau (BOETTICHER, 1929).

Die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse der einzelnen Vorkommen lassen sich wie folgt beschreiben:

Rhenser Brunnen: In Teufen von 337 m bis 391 m wurde im Streichen der tektonischen Struktur des Oberlahnsteiner Sattels die Schichtenfolge des Emsquarzits angetroffen. Die Ergiebigkeit des Mineralwasservorkommens beträgt mehrere Liter/Sekunde bei Temperaturen von 21-23°C (CARLÉ, 1975).

Südlich der Stadt Lahnstein haben Tiefbohrungen von Victoria Sprudel Mineralwasser führende Schichten innerhalb der Schichtenfolge der stark zerklüfteten Emsquarzite in Teufen zwischen 399 m (Brunnen Louise) und 450 m (Brunnen Adele) erschlossen (FREMDENERKEHRS- UND HEILBÄDERVERBAND RLP, 1991). Der Sattel wird dort durch Querstörungen durchschlagen (CARLÉ, 1975). Die Schüttungen betragen 22 l/s, die Druckhöhe des gespannten Wassers gibt CARLÉ (1975) mit 5 m über Gelände an.

CARLÉ (1975) erwähnt außerdem die Säuerlinge von Miellen und Hof Ahl in der nordöstlichen Verlängerung des Oberlahnsteiner Sattels ins Lahntal. Mit Nutzung der Victoria Sprudel-Quellen sind diese jedoch versiegt.

Der Erzsattel (Abb. 1) verläuft mit variszischem Streichen von Bad Ems über Lahnstein–Friedrichsseggen bis Braubach. Die Sattelstruktur wird durch mehrere Störungen gequert und versetzt. Im Streichen des Sattels befinden sich die ehemals (sehr) bedeutenden Erzlagerstätten der Gruben Mercur (Abteilungen Pflingstwiese und Neuhoffnung) in Bad Ems, Friedrichsseggen in Lahnstein–Friedrichsseggen sowie der Grube Rosenberg in Braubach, auf deren Tiefbausohlen hoch mineralisierte Thermalwasservorkommen angeschnitten wurden. Im Jahre 1914 wurde durch den Bergbau in der Abteilung Neuhoffnung der Grube Mercur (Bad Ems) die sogenannte Gangtherme angeschlagen. Durch den fortschreitenden Erzbergbau in der Tiefe erfolgten weitere Thermalwassereinbrüche, die mit 144 l/s gesümpft wurden (CARLÉ, 1975). Nach Einstellung des Bergbaus und Flutung entwässern die Gruben noch heute mit verringerter Schüttung über die Tiefen Stollen hoch mineralisierte Wässer in die Vorfluter (WIEBER, 1999). Das über den Stadt-

stollen (Grube Mercur, Bad Ems) auslaufende Grubenwasser weist einen hohen Thermalwasseranteil auf und wird geothermisch genutzt (WIEBER, 2014).

Die bekanntesten Thermal- und Mineralwasservorkommen des Gebietes stellen die Emser Thermalwässer dar. Sie treten im Lahntal zutage und zwar genau dort, wo die Lahn mit ihrem tiefen Einschneiden den aus quarzitäen Sandsteinen und Quarziten aufgebauten Sattelkern des Emser Quellsattels freigelegt hat. Die hangenden abdichtenden Schichten wurden durch das Einschneiden des Gewässers erodiert und der Grundwasserspiegel entsprechend auf Lahniveau abgesenkt. Dieser Bereich ist auch durch intensive CO_2 -Entgasung in der Lahn erkennbar. Der Faltenbau ist durch streichende steilstehende Aufschiebungen sowie durch zahlreiche querschlägige und diagonale Abschiebungen zerstückelt (CARLÉ, 1975). SCHREIBER (mündliche Mitteilung 2018) postuliert die Verlängerung einer 105° steichenden Störung südlich des Laacher Sees über Koblenz in das Lahntal nach Bad Ems.

Das KÖNIGLICHE OBERBERGAMT ZU BONN (1893) gibt die Anzahl der Mineralquellen mit 29 an, von denen allerdings derzeit nur 10 genutzt werden. Fünf weitere können bei Bedarf wieder in Betrieb genommen werden (Abb. 4). Neben der klassischen Nutzung als Heilbad (Badebetrieb, Trink- und Inhalationskuren) wurde eine Quelle (Neuquelle IV) zur Wärmegegewinnung genutzt. Außerdem stellt die Firma SIEMENS & CO – Heilwasser und Quellenprodukte des Staatsbades Bad Ems GmbH & Co. KG die bekannten Emser Pastillen her. Das Emser Quellensalz wird seit 1902 vertrieben. Über Heilerfolge wird bei Erkrankungen der Verdauungsorgane sowie der Atemwege und Bronchien berichtet.

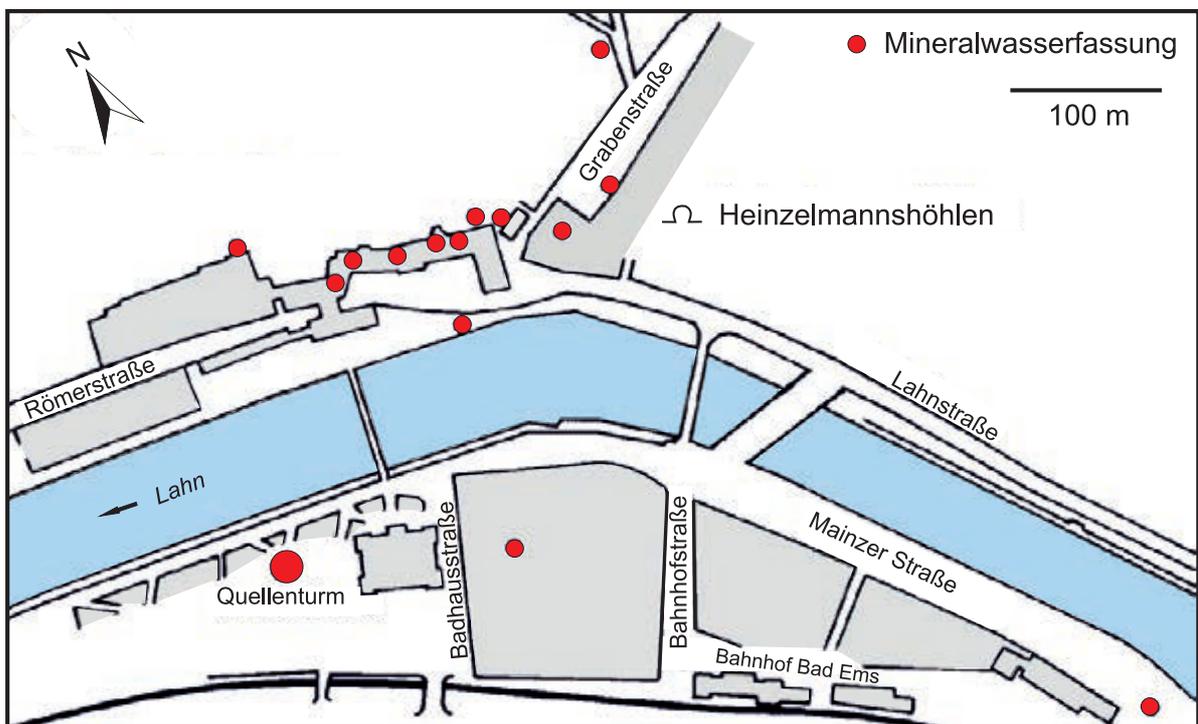


Abb. 4: Übersichtskarte der Heilquellen von Bad Ems.

Unterhalb der Dausenauer Staustufe wurden bei Bauarbeiten an der Schleuse im Jahre 1927 intensive Austritte CO_2 -haltiger Wässer auf der linken Lahnseite aus den anstehenden Tonschiefern festgestellt (MESTWERDT, 1928). Die austretenden kohlesäurehaltigen Wässer vermischten sich mit den Grundwässern der Lahnschotter. Mineralausfällungen führten zur Bildung von so genannten

Quellröhren. Die Quellaustritte liegen gemäß EHRENDREICH (1958) an der Ostflanke der Emser Mulde. Außerdem quert in diesem Bereich die Boppard – Dausenauer Störung die Lahn.

5. Mofetten

Ergänzende Forschungen zum Vorkommen geogener Gase wurden durch SCHREIBER & BERBERICH (2012) durchgeführt. Außerdem beschäftigten sich verschiedene Arbeiten von Studenten der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (z.B. BARSKI, 2012; FUHRMANN, 2014; AULENBACHER, 2015; WAGNER, 2018) mit dem Vorkommen von Sauerwässern und CO₂-Austritten in Oberflächengewässern im Taunus – Lahn – Mittelrhein – Gebiet.

In der Lahn wurden in drei Bereichen Zutritte von CO₂-führenden Mofetten kartiert (WAGNER, 2018). Zu den stärksten Ausgasungen kommt es in der Lahn im Stadtgebiet von Bad Ems über eine Strecke von mehreren 100 Metern. Weitere Mofetten befinden sich in der Lahn in den Bereichen Nievern–Fachbach sowie unterhalb der Staustufe Dausenau. Diese haben jedoch eine deutlich geringere Intensität als diejenigen in Bad Ems.

Außerdem ist der Zutritt von Kohlendioxid und hoch mineralisierten Thermalwässern auf den Tiefbausohlen der Emser Erzgruben bekannt und dokumentiert. Besonders betroffen waren die Abteilungen Neuhoffnung mit der Neuhoffnungstherme sowie die Abteilung Pfingstwiese. Auf den Tiefbausohlen der Gruben Fahnenberg (rechte Lahnseite) und Bergmannstrost (linke Lahnseite) wurden keine Thermalwasserzutritte angetroffen (BOETTICHER, 1929). Zutritte von CO₂-führenden Tiefenwässern wurden im weiteren Verlauf des Emser Gangzuges auch auf den Tiefbausohlen der Gruben Friedrichsegen (Erzbachtal in Lahnstein-Friedrichssegen) sowie der Grube Rosenberg in Braubach beobachtet.

6. Hydrochemische Beschaffenheit der Tiefenwässer

Anhand ausgewählter Analysenergebnisse werden nachfolgend die erfassten Mineralwasservorkommen charakterisiert. Die Darstellung erfolgt wiederum entsprechend den geotektonischen Strukturen von Westen in Richtung Osten.

Oberlahnsteiner Sattel:

Analysenergebnisse zu den Mineralwässern des Rhenser Brunnens wurden durch Literaturrecherche ermittelt (Tab. 2). Auffallend sind deutliche Unterschiede in der physiko-chemischen Beschaffenheit der beiden Analysen. CARLÉ (1975) gibt deutlich höhere Natrium- und Chloridgehalte an, als die Erzeugerangaben auf der Mineralwasserflasche Rhenser Classic aufweisen. Andererseits sind die Calciumkonzentrationen nach Erzeugerangaben (2014) höher als die von CARLÉ (1975) zitierten Gehalte. Gemäß der Analyse von CARLÉ (1975) ist das Wasser als Natrium-Hydrogencarbonat Thermalsäuerling zu klassifizieren. Die Erzeugerangaben auf dem Verkaufsprodukt Rhenser Classic weisen das Wasser als erdalkalisch - hydrogencarbonatisch mit deutlich geringerer Mineralisation aus.

Victoria Sprudel Lahnstein:

Analysenergebnisse liegen aus drei Literaturquellen vor (Tab. 2). Zwei Proben wurden aus den Brunnen direkt entnommen, eine weitere Probe (BARSKI, 2012) stammt aus dem Überlauf des

Mineralbrunnens. Die beiden zuerst genannten Wasserproben sind durch schwach saure pH-Werte sowie durch eine hohe Mineralisation gekennzeichnet. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Kationen sind durch Natrium dominiert, die Anionen durch Hydrogencarbonat und untergeordnet von Chlorid. Die Ionensummen der Hauptkationen zzgl. der Hauptanionen betragen 76 mmol(eq)/l CARLÉ (1975) bzw. 96 mmol(eq)/l (FREMDENVERKEHRS- UND HEILBÄDERVERBAND RLP, 1991) und 30 mmol(eq)/l (BARKSI, 2012).

Erzsattel:

Im Streichen des Erzsattels befinden sich ehemals bedeutende Buntmetallagerstätten. Der Verlauf des Sattels ist variszisch von NE nach SW. Von der auf der 8. Tiefbausohle der Grube Mercur, Abteilung Neuhoffnung angetroffenen Neuhoffnungstherme konnten Analyseergebnisse aus der Betriebsphase recherchiert werden (Tab. 3).

Tab. 2: Physiko-chemische Beschaffenheit der Thermalwässer im Bereich des Oberlahnsteiner Sattels

Quelle:	Rhenser Sprudel			Victoria Sprudel Lahnstein		
Literatur	CARLÉ (1975)	Herstellerangaben RHENSER CLASSIC	LGB (Homepage)	CARLÉ (1975) Bohrung	FREMDENVERKEHRS- UND HEILBÄDERVERBAND RLP (1991)	BARKSI (2012) Überlauf
Datum	1951	2014	1953	1930	1985	06.2012
Temp. [°C]	23,0		30,1	32,0	29,4	18,9
pH-Wert					6,20	5,80
Elektr. Leit. [$\mu\text{S}/\text{cm}$]					4500	1460
Sauerstoff [mg/l]						0,72
Redox-Pot. (mV)						329
Schüttung [l/s]	mehrere l/s			22,0		4,6
Teufe [m]			380		450 (Brunnen Adele)	
Na [mg/l]	391	61		748	905	269
K [mg/l]	3,40	4,20		17,2	18,8	9,00
Ca [mg/l]	30,3	126,0		53,7	84,5	33,0
Mg [mg/l]	37,1	22,0		29,3	46,8	17,0
Cl [mg/l]	148	67		248	473	135
HCO ₃ [mg/l]	800*	456		1630	1720	519
SO ₄ [mg/l]	159	70*		225	322	136
Fe [mg/l]					4,70	
Mn [mg/l]					0,33	
TDS [mg/l]			3758			
Σ Kationen [mmol(eq)/l]	21,4	10,8		37,7	47,5	14,8
Σ Anionen [mmol(eq)/l]	20,6	10,8		38,3	48,2	15,1

*: berechnet

Tab. 3: Physiko-chemische Beschaffenheit der Tiefenwässer im Bereich des Erzsattels.

	Abteilung Pfungstwiese		Abteilung Neuhoftungung				Grube Rosenberg
	Hill-schacht	Schacht I	Weidman-Schacht	Schacht II	Bergerolle	Neuhoftungstherme (CARLÉ, 1975)	Segen-Gottes-Stollen
Datum	06.2007	06.2007	03.2007	11.2006	11.2006		04.2013
Teufen	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche		Auslauf Entwässerungs-stollen
Temp. [°C]	24,0	24,2	24,6	23,3	24,0		16,2
Elektr. Leitf. [µS/cm]	2230	2200	2240	2230	2350		4610
pH-Wert	6,02	6,05	6,11	6,31	6,40		6,55
Sauerstoff [mg/l]	0,69	0,83	2,33	1,02	< 2		3,21
Red-Pot. [mV]*	250	244	231	246	248		223
KS _{4,3} [mmol/l]	22,2	21,2	23,0	22,5	21,0		18,5
Ca [mg/l]	110	109	133	124	124		369
Mg [mg/l]	45,5	45,7	50,2	49,9	63,4		180
Ca+Mg [mg/l]						924	
Na [mg/l]	371	372	316	344	338	447	782
K [mg/l]	8,39	8,21	9,04	20,9	23,7		10,9
F [mg/l]	n.b.	n.b.	n.b.	2,48	2,52		
Cl [mg/l]	80,5	79,7	85,8	92,2	94,6	143	652
SO ₄ [mg/l]	41,4	38,2	89,6	72,5	74,2	1670	672
HCO ₃ [mg/l]	1350	1290	1400	1370	1280	1630	1130
NO ₃ [mg/l]	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	0,5	1,0		
Fe [mg/l]	1,55	0,26	3,00	4,69	6,19		
Mn [mg/l]	1,70	1,32	1,49	1,32	1,55		
Σ Kationen [mmol(eq)/l]	25,4	25,7	25,0	25,9	26,8	65,6	67,1
Σ Anionen [mmol(eq)/l]	25,3	24,2	27,3	26,8	25,4	65,6	50,9

*: berechnet

Die Wässer sind als Calcium-Natrium-Sulfat-Hydrogencarbonat Thermalwässer zu klassifizieren (CARLÉ, 1975). Darüber hinaus wurden vom Bearbeiter aus verschiedenen Schächten sowie aus Entwässerungsstollen Wasserproben entnommen und analysiert. Es handelt sich dabei aber nicht um gezielte Beprobungen von Thermalwasseraustritten sondern um Grubenwasser gefluteter Bergwerke mit Thermalwasserzutritten. BOETTICHER (1929) zitiert Wasseraustritte auf der 15. und 16. Tiefbausohle mit 1.120 mg/l bzw. 1.460 mg/l Natriumhydrogencarbonat und 200 mg/l bzw. 210 mg/l Chlornatron.

Die Grubenwässer weisen schwach saure bis circum-neutrale pH-Werte und Temperaturen > 20°C auf. Lediglich am Entwässerungsstollen der Grube Rosenberg wurden etwas niedrigere Temperaturen von 16,2°C gemessen (Tab. 3). Die in den gefluteten Bergwerksschächten der Grube Mercur zirkulierenden Wässer sind höher mineralisiert und weisen Ionensummen von ca. 50 mmol(eq)/l auf.

Die elektrischen Leitfähigkeiten betragen zwischen 2200 und 2350 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die 1914 ange-schlagene Neuhoffnungstherme sowie die Wässer des Segen-Gottes-Stollens (SGS) sind bei Ionensummen von etwa 117 bis 132 mmol(eq)/l und elektrischen Leitfähigkeiten von 4610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (SGS) doppelt so hoch mineralisiert. Die Sauerstoffgehalte reichen von < 1 mg/l in den Schächten der Abteilung Pflingstwiese der Grube Mercur bis 2,3 mg/l im Entwässerungsstollen der Grube Rosenberg.

Die Kationen der Grubenwässer werden von Natrium dominiert, die Anionen durch Hydrogencarbonat. Beim SGS sowie der Neuhoffnungstherme sind die Erdalkali- und die Sulfatanteile höher. Darüber hinaus weisen die Wässer des SGS auffallend hohe Chloridkonzentrationen auf (Tab. 3).

Quellensattel:

Hydrochemisch sind die Emser Thermalwässer durch hohe Temperaturen sowie erhöhte Kohlendioxid -, Hydrogencarbonat -, Chlorid - und Natriumgehalte charakterisiert (Tab. 4). Die Thermalwässer sind farblos bis klar, beim Zutritt von Sauerstoff fallen amorphe Eisenhydroxide aus, die eine leichte Gelbfärbung hervorrufen. Der Geschmack ist salzig und zum Teil leicht säuerlich. Sie weisen einen schwachen Geruch nach Schwefelwasserstoff auf. Außerdem tritt sichtbar Kohlensäure aus.

Die Wässer der einzelnen Heilquellen weisen zwar Unterschiede in den Konzentrationen der einzelnen Inhaltsstoffe, der Temperaturen und den Gehalten an freier Kohlensäure auf (Tab. 4), sind jedoch gemäß der Nomenklatur für Kurorte, Erholungsorte und Heilbrunnen generell als „thermale Natrium - Hydrogencarbonat - Chlorid - Säuerlinge“ zu klassifizieren. Teilweise besitzen die Wässer Fluoridgehalte > 1 mg/l.

Dausenau:

Der gasende Säuerling beim Bau der Schleuse in Dausenau ist in der Literatur von BOETTICHER (1929) und DENNER (1956) ausführlich beschrieben. CARLÉ (1975) beschreibt die beim Bau der Schleuse aus den Tonschiefern der Ems-Stufe mit 30 mg/l Chlorid und 400 mg/l Hydrogencarbonat schwach mineralisierte, jedoch stark Kohlendioxid haltige Wässer austraten.

Tab. 4: Chemische Beschaffenheit der Emser Thermalwässer (nach: LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT RLP, 1998; Schüttungen nach STENGEL-RUTKOWSKI et al., 1988).

Quelle:	Kränchen	Kesselbrunnen	Römerquelle	Robert-Kampe-Sprudel	Bohrung II	Bohrung III	Bohrung IV	Bohrung V	Neuquelle IV
Datum	07.97	07.97	07.97	01.96	01.86	07.97	01.96	01.96	02.86
Temp. [°C]	32,1	43,6	46,2	58,0	48,6	39,5	39,0	55,2	45,0
pH-Wert	6,30	6,90	6,44	6,55	6,45	6,50	6,40	6,42	6,39
Elektr. Leit. [µS/cm]	5110	4840	5200	7340		5330	6050	6180	-
EL (25°C) [µS/cm]					4310	4270	5020	3660	3760
Sauerstoff [mg/l]	0,8	0,6	0,4	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,9
Redox [mV] (Pt//Ag/AgCl)	+200	+160	-70	-183	+128	+120	+13	-169	+119
Schüttung [l/min]	5	25	2,5	580		30			250
Na [mg/l]	935	849	921	975	1005	940	1140	820	870
K [mg/l]	18,0	18,4	19,4	16,5	19,1	18,6	21,0	15,8	18,2
Ca [mg/l]	58,8	52,6	53,7	67,0	58,5	74,3	76,0	65,0	56,0
Mg [mg/l]	36,5	30,7	32,4	40,0	36,5	52,2	55,0	43,0	37,5
Cl [mg/l]	560	527	574	590	622	486	580	395	508
HCO ₃ [mg/l]	1860	1670	1790	1980	1970	2080	2480	1890	1790
SO ₄ [mg/l]	38,0	22,0	22,0	29,0	21,5	63,0	73,0	43,0	39,1
Fe [mg/l]	1,10	1,30	1,10	0,93	1,16	2,50	1,40	1,10	1,40
Mn [mg/l]	0,13	0,20	0,13	0,12	0,11	0,13	0,07	0,12	0,16
Σ Kationen [mmol(eq)/l]	47,3	42,8	46,2	49,7	50,5	49,7	58,7	43,1	44,5
Σ Anionen [mmol(eq)/l]	47,1	42,7	46,1	49,7	50,4	49,2	58,5	43,1	44,5

7. Geochemische Beschaffenheit der Gase

Ergänzende Forschungen zum Vorkommen geogener Gase wurden durch SCHREIBER & BERBERICH (2012) durchgeführt. Außerdem beschäftigte sich WAGNER (2018) mit einer Erfassung und Zusammenstellung der Vorkommen von Mofetten und Sauerwässern im Gebiet der Unteren Lahn.

SCHREIBER & BERBERICH (2012) haben die Konzentrationen an Kohlendioxid, Methan und Schwefelwasserstoff vor Ort mittels Messgerät Dräger X-amR 7000 bestimmt. Im Fachgebiet Geologie der Universität Duisburg–Essen (Fakultät für Biologie) wurden die Gehalte an Helium und Radon bestimmt.

2009 und 2012 untersuchte SCHREIBER Mofetten in Bad Ems und Lahnstein. Als Hauptkomponente wurde jeweils Kohlendioxid festgestellt. Die Konzentrationen an Radon und Helium_{ges.} im Mittelrhein - Lahnggebiet sind deutlich erhöht. In Bad Ems tritt außerdem an wenigen Stellen Schwefelwasserstoff in Spuren auf.

In Bad Ems und Lahnstein wurden 2009 Heliumgehalte bis 160.000 ppb (Mofette Bad Ems) und 178.000 ppb (Lahnstein) gemessen. Das in 2012 erweiterte Messprogramm wies Heliumkonzentrationen bis 812.000 ppb (Bad Ems) bzw. 235.000 ppb (Lahnstein) nach (SCHREIBER & BERBERICH, 2012). Bei der zweiten Messkampagne wurden in Bad Ems außerdem hohe Radongehalte zwischen 255 und 487 Bq/l bestimmt. Die Untersuchungen in Lahnstein waren unauffällig.

8. Auswertung

Geotektonische Lage der CO₂-führenden Tiefenwasservorkommen

HART (1984) sowie WIEBER & HART (1998) haben bei Untersuchungen in der Grundwasserprovinz „Osteifel–Rheintal“ folgende Kriterien der Verbreitung von Mineral- und Thermalwässern festgestellt:

- tiefes topographisches Niveau, welches meist in tief eingeschnittenen Tälern gegeben ist,
- Nachbarschaft zu tektonischen Sätteln,
- Bereiche jüngerer Bruchtektonik.

Nach diesen Gesichtspunkten lassen sich auch die Vorkommen höher mineralisierter Mineral- und Thermalwässer sowie Mofetten des Untersuchungsgebietes einordnen:

Die Austritte CO₂-führender Tiefenwässer und Mofetten befinden sich generell in Bereichen, in denen der Emsquarzit entweder direkt oder im nahen Umfeld ansteht. Daneben besteht ein Zusammenhang mit Sattelstrukturen, die eine hohe Gebirgsdurchlässigkeit in den Sattelachsen ausweisen, insbesondere wenn diese aus spröden Gesteinen wie dem Emsquarzit bestehen. So lassen sich die Mofetten geologisch der Südostflanke des Oberlahnsteiner Sattels (Bereich Miellen–Fachbach) sowie dem Quellensattel (Bad Ems) zuordnen. Im Bereich der CO₂-Ausgasungen in Bad Ems und westlich Miellen sind die Quarzite durch die Erosion der Lahn freigelegt. Die angrenzenden ungestörten devonischen Ton- und Siltsteine besitzen eine zu vernachlässigende Gebirgsdurchlässigkeit. Sie stellen hydrogeologische Barrieren dar, zu einem Aufstieg von Kohlensäure kommt es daher nicht in nennenswertem Umfang. Aus diesem Grund beschränken sich die Kohlensäureaufstiege auf den Bereich der beschriebenen Sattelachsen, insbesondere dort, wo es zur Kreuzung regionaler Lineamente kommt, die vermutlich in Scherzonen der Kruste oder des oberen Mantels übergehen (SCHREIBER & BERBERICH, 2012). Im Rheinischen Massiv sind die NW-SE-, N-S- und +/- E-W-streichenden Störungen die hydrogeologisch bedeutendsten Richtungen (MAY, 2002). Durch die Kreuzung der beiden tektonischen Strukturen – Lahnsteiner Sattel und Emser Quellensattel und (Verlängerung der) 105° Störung aus dem Gebiet des Laacher Sees – wurden bis in große Tiefe reichende Migrationswege geschaffen, über die Tiefenwässer und Gase aufsteigen können.

Nach STENGEL-RUTKOWSKI et al. (1988) hängt die Herkunft der (Emser) Thermalwässer sicherlich mit tiefliegenden Magmenherden zusammen, was sich in den hohen Temperaturen und Koh-

lendioxidgehalten zeigt. Die Unterschiede in den Austrittstemperaturen sind auf unterschiedlich starke Abkühlung beim Aufstieg der Wässer sowie Zutritte oberflächennaher Grundwässer zurückzuführen. Auch DENNER (1956) sieht die Herkunft der Kohlensäure als juvenil (aus dem Erdinnern) an und bringt sie in Zusammenhang mit Restmagmen des tertiären Vulkanismus des Westerwaldes und der Eifel. Aussagen über die Lage und Tiefe des Magmenherdes können jedoch nicht mit ausreichender Sicherheit getroffen werden. Der Herd selbst kann räumlich weit von den Quellaustritten entfernt liegen.

Zeugnisse der tertiären magmatischen Ereignisse zeigen sich in Form von Basaltvorkommen bei Kemmenau und Welschneudorf sowie der Trachytvorkommen der Köpfe bei Arzbach. Die Trachytkegel befinden sich direkt auf dem Erzsattel und einer Störung („Hauptbesteg“). Möglicherweise kam es über die Störung zum Aufstieg der Gesteinsschmelzen. Nach neueren Erkenntnissen ist eher der Mantel Plume, der randlich die Region unterlagert, als Quelle für die thermische Anomalie und die Entstehung der Gase anzunehmen. Außerdem können tieferreichende Zirkulationssysteme beteiligt sein.

Hinweise auf den Aufstieg der Gase aus großen Teufen – möglicherweise aus der tiefen Kruste oder dem oberen Mantel – liefern die signifikant erhöhten Heliumgehalte in Bad Ems und Lahnstein. Die in Bad Ems festgestellten hohen Radongehalte sind nicht einfach zu interpretieren, da Radon eine Halbwertszeit von nur 3,8 Tagen besitzt. Die Vererzungen kommen möglicherweise als Radonträger infrage. Voraussetzung sind allerdings auch hohe Geschwindigkeiten des Gasstroms.

Anders als die Kohlensäure hat das Thermalwasser nach DENNER (1956) bereits am oberirdischen Wasserkreislauf teilgenommen (vados). Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass es sich um in größere Tiefen versickertes Oberflächenwasser handelt.

Die physiko-chemische Beschaffenheit der Kohlensäure führenden Tiefenwässer unterscheidet sich hydrochemisch signifikant von oberflächennahen Grundwässern. Kennzeichnend sind erhöhte Temperaturen und eine deutlich höhere Mineralisation (Abb. 5). Die Kationen werden durch Natrium dominiert, die Anionen durch Hydrogencarbonat, aber mit z.T. signifikanten Anteilen von Chlorid. Das Natrium/Chlorid-Verhältnis unterscheidet sich deutlich von 1, d.h. neben dem Aufstieg Na-Cl-haltiger Wässer aus dem tieferen Untergrund finden Austauschreaktionen statt, bei denen Natrium freigesetzt wird. Sulfat tritt meist nur in untergeordneter Größenordnung auf. Ausnahmen stellen die Neuhoffnungstherme sowie die Grubenwässer des SGS dar. In beiden Fällen sind auch die Gehalte an Erdalkalien höher bis dominierend. Sie sind vermutlich auf den Eintrag von Oxidationsmineralen aus der Sulfidverwitterung in den Bergwerken zurückzuführen (Abb. 5).

Die hohen Gehalte an Chlorid lassen sich nicht aus den oberflächennahen Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges ableiten, da dort keine Salzlagerstätten oder salzimpregnierte Gesteine bekannt sind. Möglicherweise stammen sie aus den Salzlagerstätten des Vogelsberges und des Fuldagebietes, wo sie ausgelaugt und über tiefe Grundwasserzirkulationssysteme herantransportiert werden. Allerdings ist auch ein Aufstieg Na-Cl-reicher Solen aus größeren Tiefen denkbar, insbesondere in Randbereichen des Schiefergebirges oder in tief eingeschnittenen Flusstälern (MAY, 1994).

Die Grubenwässer des Erzbergbaus sind insgesamt durch eine geringere Mineralisation gekennzeichnet (Abb. 5). Ebenso sind die Anteile an Chlorid und Natrium geringer als bei den Thermalwässern. Dies kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass der Anteil tieferer Grundwässer geringer ist.

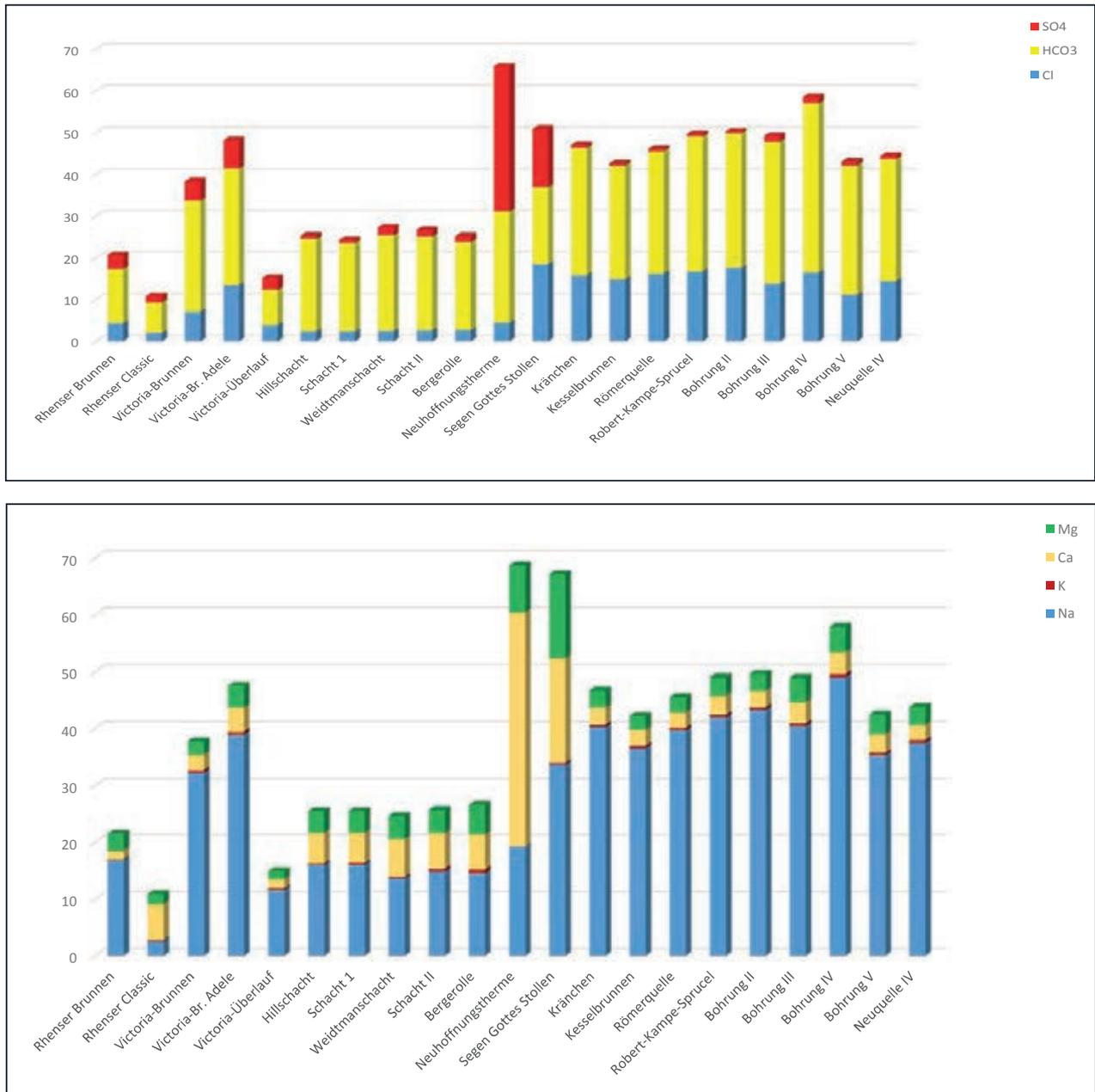


Abb. 5: Hydrochemische Beschaffenheit der untersuchten Tiefenwässer (Angaben in mmol(eq)/l).

Auf der Grundlage hydrochemischer Analysen und geochemischer Gleichgewichte lassen sich die Temperaturen berechnen, bei denen die Thermalwässer mit bestimmten geeigneten Mineralen im Gleichgewichte stehen (sogenannte Geothermometer). Die an den Austrittsstellen bestehenden Temperaturen sind durch Abkühlungs- und Vermischungsvorgänge beim Aufstieg gegenüber den tatsächlichen Temperaturverhältnissen in den Tiefen, in denen die Wässer zirkulieren und sich auch dementsprechende geochemische Gleichgewichte mit Mineralien eingestellt haben, reduziert. Im vorliegenden Fall eignen sich Gleichgewichtsberechnungen mit Chalcedon, über die sich eine Temperatur von 81°C ergibt (HOHBERGER, 2003). Eine grobe Abschätzung über die Zirkulationstiefe der Thermalwässer, in der die entsprechenden Temperaturen herrschen, lässt sich über die geothermische Tiefenstufe durchführen. Im Rheinischen Schiefergebirge nimmt die Temperatur je 100 m um ca. 3K zu. Unter Annahme einer Grundtemperatur des oberflächennahen Grundwassers (Erdwärme) von 10°C lässt sich die Zirkulationstiefe der Thermalwässer mit über 2 Kilometer abschätzen.

Anders als die in den Sattelachsen aufsteigenden Thermalwässer waren die bei Bauarbeiten in Dausenau angetroffenen Sauerlinge nur gering mineralisiert. Insbesondere wurden auch nur geringe Chloridgehalte von 30 mg/l analytisch festgestellt. Hier kommt es folglich nur unterordnet zum Aufstieg von Tiefenwässern. Dem stehen jedoch die Ausfällungen der beobachteten Quelläustritte entgegen. Allerdings besteht ein starker Zutritt von Kohlendioxid, wie er in gering mineralisierten Sauerbrunnen auf den Hochflächen des Taunus häufiger vorhanden ist. MESTWERDT (1928) interpretiert die Quellaustritte so, dass der Emsquarzit in Verbindung mit den überlagernden Tonschiefern der „Quellbringer“ ist, wobei er eine hydraulische Verbindung des Quarzits zu den Emser Thermalwässern postuliert. Ein Modell der hydrogeologischen Verhältnisse von Bad Ems mit dem Aufstieg der Thermalwässer und Gase ist in Abb. 6 dargestellt.

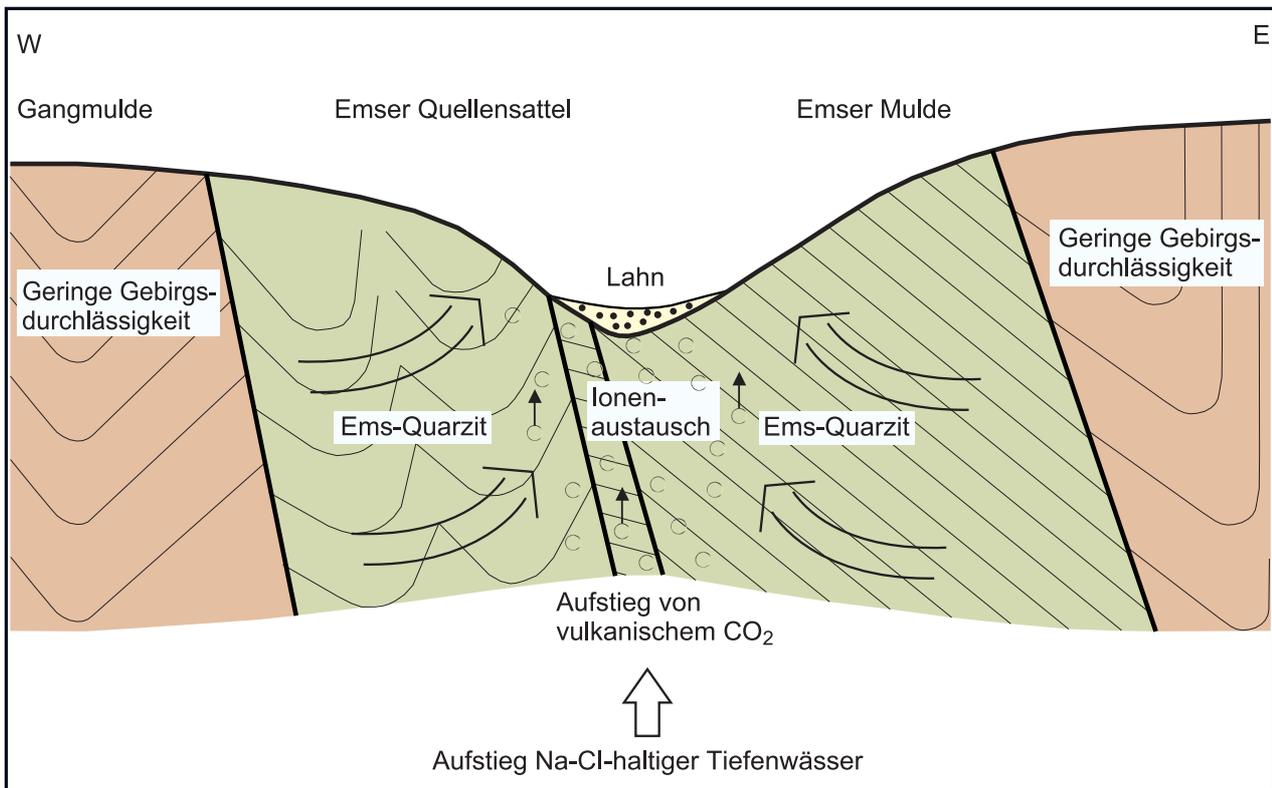


Abb. 6: Schematisches Modell der hydrogeologischen Verhältnisse in Bad Ems (ohne Maßstab).

Schriften

- AULENBACHER, C. (2015): Hydrochemische Beschaffenheit und Genese und Entstehung ausgewählter Mineralwasservorkommen des Taunus. – 38 S., 24 Abb., Mainz (Bsc.-Arb., unveröff.).
- BARSKI, C. (2012): Zur Hydrogeologie der Mineral- und Thermalquellen an der Unteren Lahn. – 70 S., Mainz (Bsc.-Arb., unveröff.).
- BOETTICHER, H. (1929): Quellen und Emser Bergbau. – 131 S., Berlin.
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Geologie, Chemismus, Genese. – Bücher d. Zeitschr. Naturwiss. Rdsch. XXIV: 643 S., 14 Abb., 1402 Tab., 15 Karten in Mappe, Stuttgart.
- DENNER, J. (1956): Geologie der Emser Thermen und die Emser Quellen-Bergwerksfrage. – Heilbad und Kurort, 6: 20 S., 10 Abb., Gütersloh.

- EHRENDREICH, H. (1958): Stratigraphie, Tektonik und Gangbildung im Gebiet der Emser Blei - Zinkerzgänge. – Z. dt. geol. Ges., **110**: 561-582, 7 Abb., Hannover.
- ELKHOLY, H. & KRÖLL, R. (1998): Die Typuslokalität „Hohenrheiner Hütte“: Emsquarzit, Hohenrhein- oder Laubach Schichten?. – Mainzer geowiss. Mitt., **27**: 147–158, 1 Abb., Mainz.
- FREMDEVENVERKEHRS- UND HEILBÄDERVERBAND RLP (Hrsg., 1991): Das Bäderbuch Rheinland-Pfalz. – 135 S., Koblenz.
- FUHRMANN, F. (2014): Zur Hydrogeologie der Mineralquellen des Taunus. – 78 S., Anh., Mainz (Bsc.-Arb., unveröff.).
- GAD, J. (in Vorbereitung): Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25 000 Blatt 5612 Bad Ems.
- GAD, J., SCHÄFER, P. & WEIDENFELLER, M. et al. (2007): Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25 000 Blatt 5611 Koblenz.
- HART, R. (1984): Eine genetische Klassifikation der Mineral- und Süßwässer im Unteren Ahrtal zur Erfassung oberflächennaher Mischvorgänge. – 95 S., 38 Abb., 16 Tab., Anh., Aachen (Dipl.-Arb., unveröff.).
- HERBST, F. & MÜLLER, H.-G. (1964): Raum und Bedeutung des Emser Gangzuges. – 39 S., Anh., Bad Ems.
- HINTZ, E. & GRÜNHUT, L. (1916): Begriffsbestimmung und Abgrenzung der Mineralwässer. – In: DIETRICH & KAMINIER [Hrsg.]: Handbuch der Balneologie, medizinischen Klimatologie und Balneogeographie, **1**: 155-179, Leipzig.
- HOHBERGER, K.-H. (2003): Neuabgrenzung des Heilquellenschutzgebietes für das Staatsbad Bad Ems. – Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz: 25 S. Mainz (unveröff.).
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2009): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 384 S., 120 Abb., 90 Tab., Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- KAYSER, E. (1891): Geologische Karte von Preussen und den thüringischen Staaten 1:25 000 Blatt 5611 Coblenz.
- KAYSER, E. (1892): Erläuterungen zu Blatt Bad Ems der geologischen Spezialkarte von Preussen. – Preuss. Geol. Landesanstalt, 42 S., 2 Kart.; Berlin.
- KÖNIGLICHES OBERBERGAMT ZU BONN (Hrsg.), (1893): Beschreibung der Bergreviere Wiesbaden und Diez. – 252 S., Anlagen, Bonn.
- LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.), (1998): Die Heilquellen des rheinland-pfälzischen Staatsbades Bad Ems - Fakten und Daten im Überblick. – 128 S., Anlagen, Mainz.
- MAY, F. (1994): Zur Entstehung der Mineralwässer des Rheinischen Massivs. – 136 S., Anh., Aachen (Diss.).
- MAY, F. (2002): Säuerlinge der Vulkaneifel und der Südeifel. – Mainzer geowiss. Mitt. **31**: 7-57, Mainz.
- MESTWERDT, A. (1928): Gutachten der Preußischen Geologischen Landesanstalt über die Möglichkeit einer Einwirkung des Dausenauer Schleusenbaus auf die Emser Quellen. – In: BOETTICHER, H. (1929): Emser Quellen und Bergbau: 101-103, Berlin.
- MICHEL, G. (1997): Mineral - und Thermalwässer - Allgemeine Balneogeologie. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 7: 397 S., 104 Abb., 72 Tab., Stuttgart.
- MITTMAYER, H.-G. (2008): Unterdevon der Mittelrheinischen und Eifeler Typgebiete (Teile von Eifel, Westerwald, Hunsrück und Zaunus). – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg): Stratigraphie von Deutschland VIII. Devon. – SDGG, **52**: 139 – 203, Hannover.
- REQUADT, H. (1991): Fazies und Paläogeographie des Devons in der südwestlichen Lahnmulde (Rheinisches Schiefergebirge). – Mainzer geowiss. Mitt., **20**: 229 – 248, 4 Abb., Mainz.
- SANDBERGER, F. (1847): Übersicht der geologischen Verhältnisse des Herzogthums Nassau. – Wiesbaden.

- SARHOLZ, H. J. (1987): Bäder und Mineralbrunnen im Kreisgebiet. – In: Kreisverwaltung des Rhein - Lahn - Kreises [Hrsg.]: Der Rhein - Lahn - Kreis: Landschaft - Geschichte - Kultur unserer Heimat: 19-41, Oberwesel.
- SCHMIERER, TH. (1934): Geologische Karte von Preussen und benachbarten deutschen Ländern 1:25 000 Blatt 5611 Koblenz.
- SCHREIBER, U. & BERBERICH, B. (2012): Monitoring geogener Gase in der West-, Ost- und Südeifel sowie im Mittelrhein-/Lahngebiet. – 37 S., Essen (unveröff.).
- STENGEL-RUTKOWSKI, W., DILLMANN, W. & HOHBERGER, K.H. (1988): Hydrogeologie des Limburger Beckens und seiner östlichen und westlichen Randgebiete. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., **70**: 201-213, 6 Abb., 1 Tab., Stuttgart.
- WAGNER, N. (2018): CO₂- und Mineralwasservorkommen im Laacher See - und Lahngebiet. – 64 S., Mainz (Bsc.-Arb., unveröff.).
- WIEBER, G. (1999): Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilbererzbergbaus an Beispielen des westlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Saar-Nahe-Senke: Hydraulik, hydrochemische Beschaffenheit und umweltgeologische Bewertung. – 250 S., 69 Abb., 57 Tab., Gießen (Habil. – Schrift).
- WIEBER, G. & HART, R. (1998): Hydrogeologische und hydrochemische Besonderheiten der Grundwässer im Mündungsbereich der Ahr. – Mainzer geowiss. Mitt., **27**: 217–234, 8 Abb., 8 Tab., Mainz.
- WIEBER, G. (2014): Hydrogeologie und Wärmefluss der gefluteten Grube Mercur in Bad Ems, Rheinisches Schiefergebirge. – Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F., **96**: 361-377, 8 Abb., 3 Tab., Stuttgart 2014.

Manuskript eingegangen am 18.9.2018

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. GEORG H.E. WIEBER

¹Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Emy Roeder Straße 5, D – 55129 Mainz

²Johannes Gutenberg Universität Mainz, Institut für Geowissenschaften, J.-J. Becher Weg 21, D– 55128 Mainz

E-Mail: wieber@uni-mainz.de