

Hydrogeologische Untersuchungen zum geothermischen Potential der ehemaligen Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter, Untere Lahn-Revier, Rheinisches Schiefergebirge

GEORG H.E. WIEBER

Zusammenfassung: Untersucht wurden die hydrogeologischen Verhältnisse und der Wärme- flux der gefluteten Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter, Untere Lahn-Revier. Die Grube zählte mit einer Abbautiefe bis 1.100 m zu den tiefsten Nichteisenerzbergwerken Deutschlands. Nach der Flutung durchziehen die Stollen und Schächte das devonische Gebirge wie eine Tiefendränage und entwässern das Bergwerk über einen Erbstollen in die Lahn. Durch den Erzabbau und die anschließende Flutung wurde ein bedeutendes Wasserreservoir innerhalb des ansonsten überwiegend nur gering Grundwasser-höffigen Rheinischen Schiefergebirges geschaffen. Auf den Tiefbausohlen treten CO₂ führende Mineralwässer zu. Die über den Entwässerungsstollen ungenutzt abfließenden Grundwässer weisen mit Schüttungen von 10 l/s (Sommerhalbjahr) und 15 l/s (Winterhalbjahr) sowie Temperaturen um 20 °C ein hohes geothermisches Potential auf.

Summary: The hydrogeology and the geothermal potential of the flooded mine Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter, Rhenish Massif were investigated. The underground workings reached a depth of 1,100 m. Therefore this mine was one of the most important and deepest non-ferrous metal ore mines in Germany. The ground water hydraulics in the now flooded mine are characterized by high differences in rock permeability. Mineral water springs were found in deeper levels of the mine. The mine water hydraulics can be described as a system of communicating pipes dominated by shafts and galleries. Degassing triggers a gas lift and a multi-component turbulent flow. This results in minor differences in the physico-chemical composition of the groundwater within these shafts. Mine dewatering happens by a deep adit with 10 l/s (hydrological summer half-year) and 15 l/s (hydrological winter half-year) respectively. The temperature of the discharge ground water is not less than 20 °C. Therefore there is a high geothermal potential that can be used for domestic heating by heat pump technology.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die ehemalige Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter befindet sich an der Lahn und ist Teil des 6. Gangzuges gemäß WENKENBACH (1865). In der Grube wurden sulfidische Buntmetallerze wie silberhaltiger Bleiglanz und Zinkblende abgebaut. Sie gehörte zu den tiefsten Erzbergwerken Deutschlands und erreichte eine Endteufe von ca. 1.100 m. Durch den Bergbau wurden auf den Tiefbausohlen warme, Kohlensäure führende Wässer angetroffen. Nach Einstellung des Bergbaus erfolgte die Flutung der Grube. Sie entwässert heute deutlich sichtbar zwischen Obernhof und Laurenburg über den Lahnstollen in die Lahn (Abb. 1). Im Rahmen eines Projektes galt es, die Hydrogeologie und den Wärmefluss der Grube zu klären und Möglichkeiten zur geothermischen Nutzung aufzuzeigen.

Die gemeinnützige Stiftung Scheuern betreibt in Laurenburg ein Heilerziehungs- und Pflegeheim, welches sich in unmittelbarer Nähe der ehemals sehr bedeutenden Erzgrube Holzappel befindet. Ein wasserführender Stollen - der Herminenstollen - verläuft unmittelbar neben den

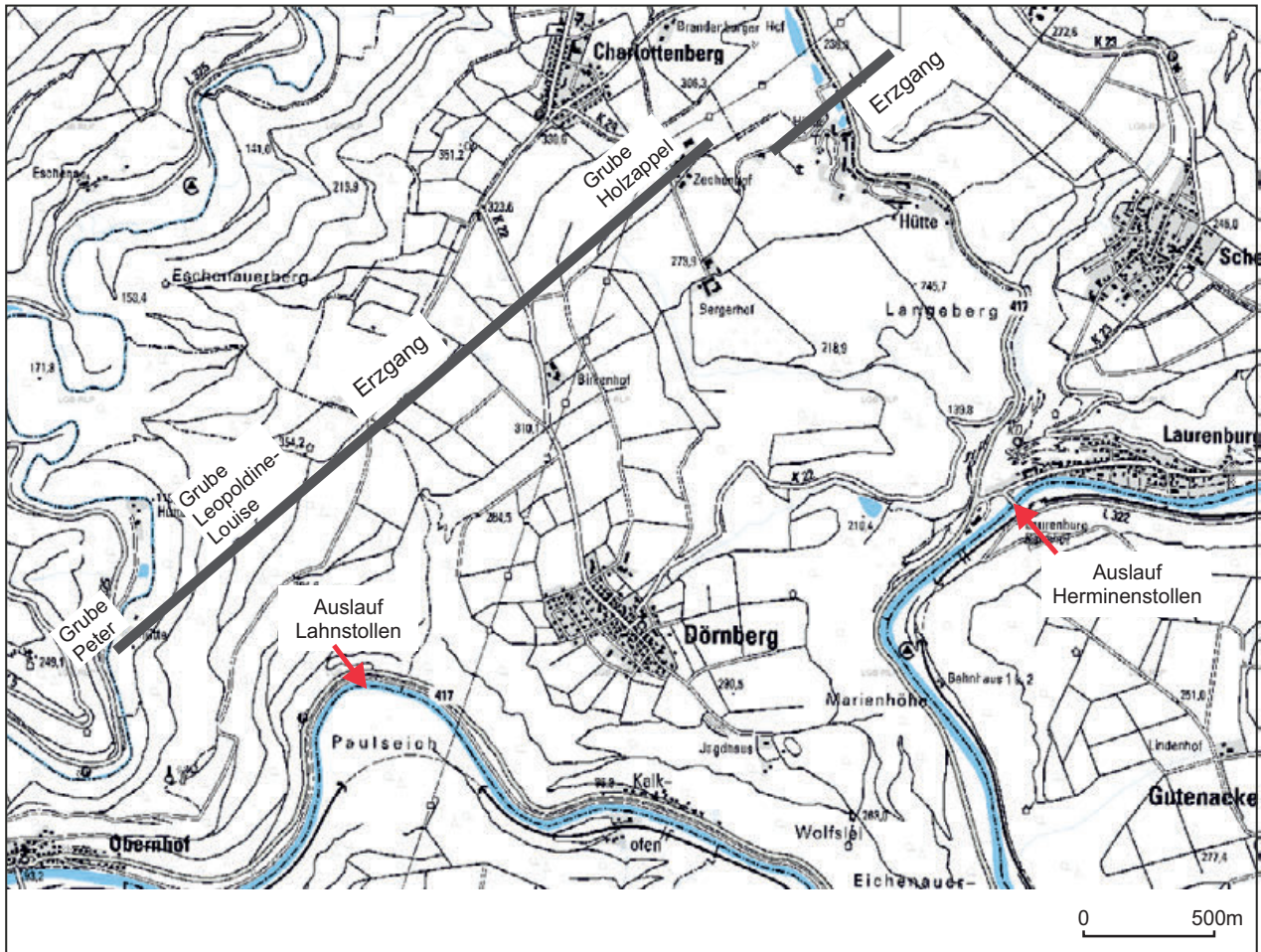


Abb. 1: Lageplan des Verlaufs der Erzgänge und der Ausläufe Lahnstollen und Herminenstollen.

Gebäuden. Grubenwässer des ehemaligen Erzbergbaus können ein hohes geothermisches Potential aufweisen und werden bereits in Deutschland an mehreren Standorten genutzt (WIEBER & POHL, 2008).

2. Geologisch – hydrogeologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im rechtsrheinischen Rheinischen Schiefergebirge an der Unteren Lahn. Die Lahn bildet die Grenze zwischen Taunus im Süden und Westerwald im Norden. Geographisch befindet sich das ehemalige Grubenfeld nördlich der Lahn zwischen Laurenburg im Osten und dem Gelbach im Westen im SW-Quadranten der Geologischen Karte 1:25.000 Blatt 5613 Schaumburg. In Richtung Norden reicht es bis Dörnberg Hütte.

Durch die Verbundgrube wurde der Holzappeler Gangzug, der in Gesteinen der Weinähr- und Seelbach-Formation aufsetzt, aufgeschlossen (Abb. 2). Der Sedimentationsraum befand sich im südwestlichen Bereich der Lahnmulde. Die stratigrafische Gliederung ist in der Tabelle 1 dargestellt.




Tab.1: Statigrafische Gliederung des Emsiums GK 1:25.000 Blatt 5613 Schaumburg.

Stufe	Unterstufe	Blatt Schaumburg (Lahnmulde) nach Requadt (1990)
Oberes Emsium	Kondel Laubach	Ruppach Schiefer
	Lahnstein	Scheidt-Formation z.T. mit Crinoidensandstein
Unteres Emsium	Vallendar Singhofen	Schichtlücke Seelbach-Formation mit Bremberg- und Obernhof- Porphyroid an der Basis
	Ulmen	Weinähr-Formation mit Winden- und Holzappel- Porphyroid





Quartär

Holozän

-  Künstliche Auffüllungen
-  Talaue-Ablagerungen
-  Bimstuff, vermutlich des Laacher-See-Ausbruchs

Pleitozän




-  Hangschutt
-  Hauptterrassen (Lahn)

Tertiär

Vallendarer Schotter

-  Niveau 247-278 m NN
-  Niveau 289-304 m NN

Unteremsium

-  Porphyroide
-  Seelbach-Formation
-  Weinähr-Formation

 Erzgang

 Störung

0 500m

Abb. 2: Ausschnitt der Geologischen 1:25.000 Karte Blatt 5613 Schaumburg.

Die Sedimentgesteine des Unteren Emsiums sind im Untersuchungsgebiet als hellgraue, quarzitisches feingebänderte Sandsteine in Wechsellagerung mit dunkelgrauen schiefrigen Siltsteinen ausgebildet. Mehrere einige Meter mächtige, umgelagerte vulkanische Aschelagen (Porphyroide) und dunkle schiefrige Tonsteinfolgen sind zwischengelagert. Die Vallendar Unterstufe konnte auf dem Blatt Schaumburg nicht bestätigt werden (REQUADT 1990). Die Mächtigkeiten der Gesteine mit Ulmen-Alter gibt REQUADT (1990) mit mindestens 1.750 m an. Die hangende Seelbach-Formation ist ca. 1.200 m mächtig. Der Holzappeler Gang streicht NE – SW und lässt sich von Dornberg-Hütte (südlich Holzappel) über ca. 4 km bis in die Gegend von Weinähr westlich des Gelbachs nachweisen (Abb. 1 und 2).

Hydrogeologisch stellen die verbreiteten Festgesteine der Weinähr- und Seelbach-Formation Kluftgrundwasserleiter mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit dar. Lediglich in stärker tektonisch zerrütteten Gesteinsfolgen oder im Bereich von mächtigeren Erz- und/oder Quarzgängen – insbesondere nach Abbau – ist mit höheren Durchlässigkeiten und Ergiebigkeiten zu rechnen.

Im Umfeld des Pflegeheims sind auf der geologischen Karte (Abb. 2) Festgesteine der Seelbach-Formation (SE) kartiert, die von Talauen-Ablagerungen (qh) überlagert werden. Dabei handelt es sich um Sedimente der Niederterrasse der Lahn, die gemäß der GK 25 Blatt Schaumburg als Lehm, Ton, Schluff, Sand, Kies ausgebildet sein können. Die (Niederterrasse-) Schotter stellen Porengrundwasserleiter dar, während die überlagernden bindigen Deckschichten als Grundwasserhemmer zu klassifizieren sind. Hydraulisch ist das Grundwasser an die Lahn angebunden. Der Grundwasserstand ist von den Wasserständen und Abflüssen der Lahn abhängig.

3. Die ehemalige Grube Holzappel – Leopoldine-Louise - Peter

Das Grubenfeld der Grube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter liegt nördlich der Lahn. Auf dem Gangzug bauten 3 Gruben. Dies waren von Nordosten in Richtung Südwesten die Gruben Holzappel, Leopoldine-Louise und Peter (Abb. 3). Die Bergwerke haben 4 Erzgänge erschlossen. Dies waren von Hangenden zum Liegenden:

- der „Weiße Gebirgsgang“,
- der „Hauptgang“,
- das „liegende Trum“ und
- der „Quergang“.

Die Mineralisation besteht aus Bleiglanz (PbS), Zinkblende (ZnS) und untergeordnet Kupfersulfiden. Die Gänge fallen mit ca. 50° in Richtung SE ein und sind durch mehrere Störungen gegeneinander versetzt (Abb. 3). Die Verbundgrube verfügte über 13 Schächte (Abb. 3).

Der tiefe Stollen der Grube Holzappel ist der Adelheidstollen, dessen Mundloch sich auf einer Höhe von ca. 97 m NN im Garten des Schlosses Laurenburg befindet. Der Adelheidstollen geht in Richtung Südwesten in den Hüttenstollen der Grube Leopoldine-Louise über. Westlich des Gelbachs befindet sich der Tiefe Stollen der Grube Peter auf einem Niveau von ca. 110,9 m NN.

Die wichtigsten Schächte der Grube Holzappel waren der Stephanschacht (Förderschacht) und der Mittelschacht, der als Wetter- und Materialförderschacht diente (SLOTTA 1983; SCHEID 1995). Im Feld der Grube Holzappel befinden sich weiterhin der Herminenschacht (Teufe ca. 60 m), der Louisenschacht (Teufe ca. 90 m), der Holzappeler Grenzschacht (Teufe ca. 50 m),

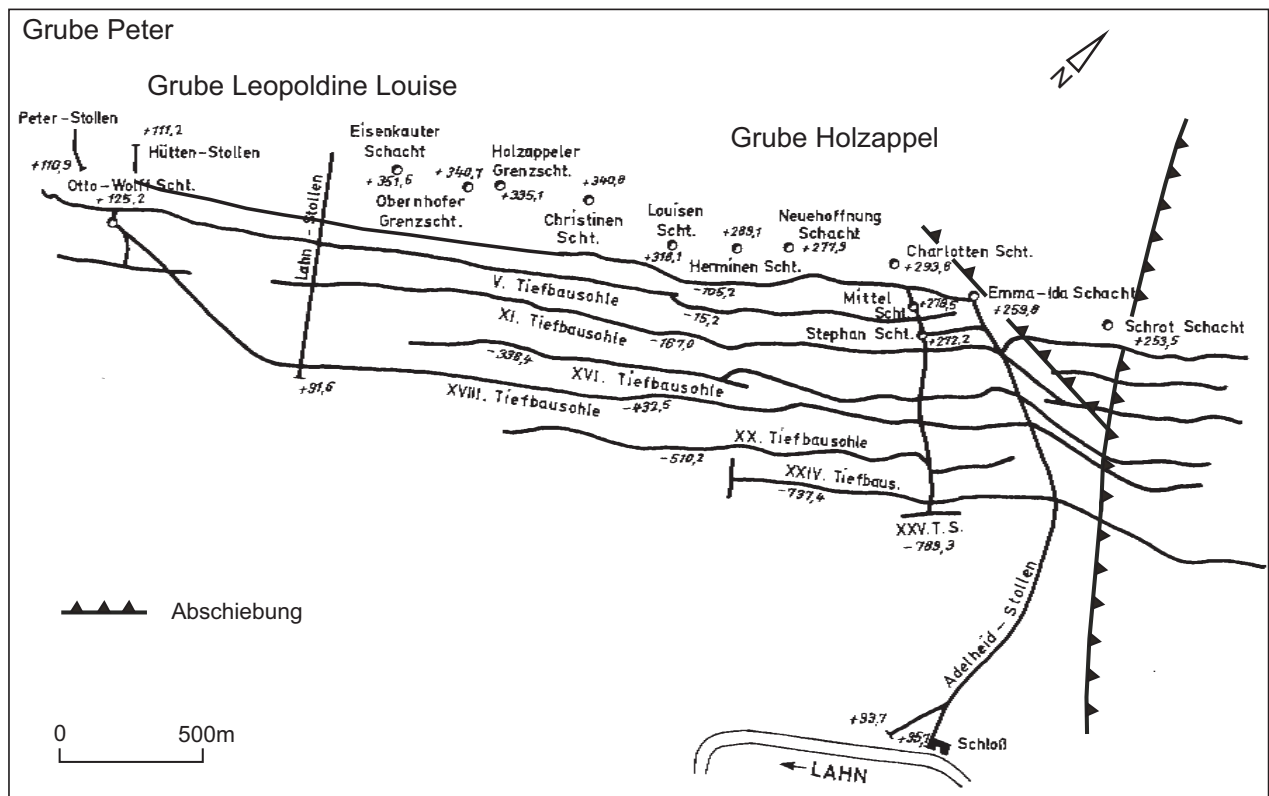


Abb. 3: Riss der Grube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter mit den wichtigsten Schächten und Sohlen/Tiefbausohlen (ergänzt auf Grundlage von HERBST 1969).

der Christinenschacht (Teufe ca. 80 m), der Neuhoffnungsschacht (Teufe ca. 50 m), der Charlottenschacht (Teufe ca. 75 m), der Emma-Ida-Schacht (Teufe 157 m) sowie der Schrotschacht (Teufe ca. 70 m). Durch diese Schächte wurden die oberen Bereiche der Lagerstätte erschlossen. Soweit die Bauzeit bekannt ist, erfolgte das Abteufen zwischen 1764 und 1822 (SCHEID 1986).

Die Grube Leopoldine-Louise baute im südwestlich anschließenden Feld. Allerdings ließ hier die Erzführung des „Hauptganges“ gegenüber der Grube Holzappel nach. Im Hangenden des „Weißen Gebirgsganges“ wurde ein weiterer Erzgang, das „Hangende Trum“, angetroffen. Die Erzführung war gering. Es wurden nur einige Bleiglanzmittel angetroffen. Allerdings war der Kupferkiesgehalt der Erzmittel höher als bei der Grube Holzappel. Entwässert werden die Gruben Holzappel und Leopoldine-Louise über den Lahnstollen, der zwischen Obernhof und Laurenburg in die Lahn mündet (Abb. 3). Außerdem wurde die Lagerstätte über den Hütten-, Schleifer-, Heuweiger-, Martins- und Hohlschleifer-Stollen erschlossen. Die Stollenmundlöcher befinden sich im Gelbachtal zwischen 111 und 259 m NN. Die Grube verfügt über einen Tiefschacht (Otto-Wolf-Schacht) sowie den Eisenkauter Schacht (Teufe um 60 m) und den Obernhöfer Grenzschacht (Teufe um 50 m). Mit dem Abteufen des Otto-Wolf-Schachtes wurde 1935 begonnen. Den Baubeginn des Eisenkauterschachtes gibt SCHEID (1986) mit 1764 an.

Verbunden sind die beiden Grubenfelder über den Adelheid-/Hüttenstollen sowie die V. und XVIII. Tiefbausohle (Abb. 3 und 7).

Die Grube Peter besaß nur geringe Bedeutung. Durch einen Stollen sind 6 meist raue Gangtrümmer durchfahren worden. Über die V. Tiefbausohle besteht eine Verbindung zum Grubenfeld Leopoldine-Louise beziehungsweise zum Otto-Wolf-Schacht.

Aktenkundig ist der Bergbau auf dem Holzappeler Gangzug seit 1751. Allerdings liegen deutliche Hinweise auf weiter zurückliegende bergbauliche Tätigkeiten vor. Der älteste Hinweis ist mit der Jahreszahl 1535 an der Wettertür des Heuwegerstollens im Gelbachtal überliefert. Von 1761 bis 1930 ging Bergbau ohne Unterbrechung um. Die angereicherten Erze wurden zunächst in der Obernhofener Hütte im Gelbachtal verhüttet. In den Jahren 1769 - 1770 erfolgte die Errichtung und anschließende Inbetriebnahme eines Poch- und Waschwerkes sowie einer Bleihütte in Dörnberg-Hütte. 1775 wurde bereits in vier Öfen Blei geschmolzen. 1785 begann die Aufwältigung des Adelheidstollens am Ortseingang von Laurenburg. Er diente bis zur Fertigstellung des Lahnstollens im Jahr 1848, der noch heute sichtbar zwischen Obernhof und Kalkofen in die Lahn entwässert, als Tiefer Stollen zur Wasserhaltung. 1866 erfolgte die Verlegung der Erzaufbereitung von Dörnberg-Hütte nach Laurenburg an die Lahn, wo eine neue Aufbereitungsanlage errichtet worden war. Nach SCHEID (1986) wurden die Erze nun durch den Adelheidstollen gefördert.

Nach der Einstellung des Bergbaus und der Erzaufbereitung im Jahre 1954 wurden die Halden, Schlammteiche und sonstigen Einrichtungen teilweise rekultiviert (WIEBER 2016). Der Erbstollen (Lahnstollen) entwässert weiterhin die untertägigen Bergwerksanlagen auf Lahnniveau. Weitere, allerdings kleinere Halden befinden sich im Streichen des Gangzuges. Durch sie waren die oberen Teufen der Lagerstätte erschlossen. Sie weisen einen Bewuchs mit typischer Haldenvegetation auf.

4. Abbau und Wasserhaltung

Bereits zu römischer Zeit wurden die steil einfallenden Erzgänge abgebaut. Von den Anfängen des Bergbaus bis spät ins Mittelalter war die Erzgewinnung vielfach nur ein reines Moltern. Mit vermehrtem Erzbedarf ging der Bergbau zum Tagebau über. Zahlreiche Pingen sind Zeugnisse dieses alten Bergbaus und zeichnen den Verlauf der bereits im Mittelalter bekannten Gänge nach. Der nächste Entwicklungsschritt war das Abteufen kleiner Schächte, die dann mit dem Verlauf des Ganges vertieft wurden. Mit zunehmender Abbautiefe stellten sich jedoch Wasserhaltungsprobleme ein. Es wurde zum Stollenbau übergegangen. Diese wurden mit Schlägel (Hammer) und Eisen (Keil) hergestellt und waren zunächst ca. 1 m breit und 2 m hoch. Die Auffahrtsgeschwindigkeit lag bei weichem und mittelfestem Gestein bei 5 - 10 cm/Schicht (WILD & BÜHLER 1993). Bei stärkerer Wasserführung enthielten sie Röschen oder Tretwerk. Zu Beginn des 17. Jahrhunderts erfolgte der Stollenvortrieb und der Abbau durch Bohren und Sprengen mittels Schwarzpulver. Abgebaut wurde im sogenannten Strossenbau. Ab etwa der Mitte des 17. Jahrhunderts ging - mit fortschreitender Bergtechnik - der Abbau zum Firstenbau beziehungsweise später zum Firstenstoßbau über. Bei den steil einfallenden Gängen der Unteren Lahn, des Hunsrücks, der Eifel und des Siegerlandes erfolgte meist Versatzbau (Abb. 4 und 5).

Die im Rheinischen Schiefergebirge verbreiteten devonischen Ton- und Siltsteine lassen zwar nur eine geringe Grundwasserneubildung zu, aber im Bereich ausbeißender Quarz-/Erzgänge traten - vor allem nach erfolgtem Abbau - erhebliche Sickerwassermengen zu (EINECKE 1932). Vergleichsweise einfach konnte bei dem stark zertalten Relief des Schiefergebirges der Grundwasserspiegel durch Wasserhaltungsstollen auf die Höhe des nächsten Vorfluters bzw. auf Talniveau abgesenkt werden. Bei einem tieferen Abbau musste das Wasser jedoch gehoben werden. Dies geschah zunächst durch Wasserziehen mittels Handhaspel und Seil, später durch Pferdegöpel und Wasserräder. Aber bereits Mitte des 15. Jahrhunderts kamen im Nassauer

Gebiet (Untere Lahn) Hubpumpen zum Einsatz (EINECKE 1932). Jedoch erst mit fortschreitender Entwicklung der Maschinenteknik im 19. und 20. Jahrhundert konnte eine wirtschaftliche Förderung des Grubenwassers bei stärkeren Wasserzuflüssen auch in größerer Tiefe erfolgen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts richtete man bei den bedeutenderen Gruben elektrische Zentralen über Tage ein, durch die elektrische Kolben- und Hochdruckzentrifugalpumpen unter Tage angetrieben wurden. Diese erlaubten Förderungen von mehreren Kubikmetern Wasser pro Minute.



Abb. 4: Untere Lahn-Revier – abgebauter Erzgang (weiße Linie) mit Versatz.



Abb. 5: Abgebauter Erzgang mit Handversatz (rechts) und Erzrolle mit Carbonatausfällungen (links).

5. Hydrologie und Hydrogeologie der Grube Holzappel

Während des aktiven Bergbaus musste eine Wasserhaltung betrieben und zutretende Grubenwässer nach über Tage abgeleitet werden. Im Grundwasser erfüllten Bereich erfolgte die Grundwasserabsenkung bis unterhalb der Abbaubereiche. In den oberen Teufen wurde das zutretende Wasser (Tagwasser) über Stollen mit Röschen nach außen geleitet. Auf Vorfluterniveau wurde ein Wasserlösungs- bzw. Erbstollen (stellt die Entwässerung mehrerer, miteinander verbundener Gruben sicher) angelegt. Über diese „Tiefe Stollen“ wurde das Grubenwasser in der Regel im freien Gefälle abgeleitet. Da die Verbundgrube zunächst aus drei eigenständigen Einzelgruben bestand, verfügt sie auch über drei Tiefe Stollen. Dies sind:

- der Adelheidstollen der Grube Holzappel,
- der Hüttenstollen der Grube Leopoldine-Louise und
- der Tiefe Stollen der Grube Peter.

Da der Abbau in der Verbundgrube bis in eine Teufe von ca. 1.100 m reichte, musste der Grundwasserspiegel während des aktiven Bergbaus bis unterhalb dieser Teufe abgesenkt werden. Nach Aufgabe des Bergbaus wurde auch die Wasserhaltung eingestellt. Das Grundwasser stieg wieder bis auf das Niveau des Erbstollens (Lahnstollen), über den das Grubenwasser im freien Gefälle in den Vorfluter abgeleitet wurde (Abb. 3 und 7), an.

Über Abbau-Pingen und Bergsenkungsbereiche kommt es häufig auch noch lange in der Nach-Bergbau-Zeit zu hohen Einträgen von Sickerwasser in das Grubengebäude; z.T. wird Oberflächenwasser auch direkt eingeleitet (z.B. Hochwasserentlastung).

Der Bergbau hat in der bearbeiteten Verbundgrube ein Hohlräumssystem (Stollen und Strecken) von über 40 km Länge hinterlassen (WIEBER 1999). Die einzelnen (Tiefbau-) Sohlen sind über Tief- und Blindschächte sowie Erzrollen miteinander verbunden. So entstand ein komplexes System kommunizierender Röhren und unterschiedlich durchlässiger – z.T. hoch permeabler – Abbaubereiche innerhalb der devonischen Sedimentgesteine, die überwiegend nur eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.

Hydraulisch kann dieses System vereinfacht als überdimensionale Tiefendränage angesehen werden (WIEBER 1999). Durch das Anschneiden von Tiefenpotentiallinien und gleichzeitiger Druckentlastung infolge des resultierenden Absenkungstrichters kommt es auch zum Aufstieg von tieferen Grundwässern, die sich in ihrer hydrochemischen Beschaffenheit deutlich von oberflächennahen Grund- und Grubenwässern unterscheiden können.

Gemäß HERBST (1969) ist der Lahnstollen der Hauptentwässerungsstollen der gesättigten Zone (Abb. 3). Er entwässert auf einer Höhe von 91,6 m NN in die Lahn. Der Adelheid- und Herminnenstollen führen (in der Regel) Wasser der ungesättigten Zone aus der Grube Holzappel nach über Tage ab. Die Stollenmundlöcher haben topographische Höhen von 93,7 bzw. 95,7 m NN (Abb. 3). Der Hütten-Stollen entwässert das Sickerwasser der ehemaligen Grube Leopoldine-Louise in Richtung Gelbach, sein Stollenmundloch befindet sich auf 111,2 m NN.

Die Grube Peter liegt westlich des Gelbachs und ist mit der Verbundgrube Leopoldine – Holzappel über die (geflutete) V. Tiefbausohle verbunden (Abb. 7). Das Mundloch des Tiefen Stollens befindet sich auf einer topographischen Höhe von ca. 110,9 m NN.

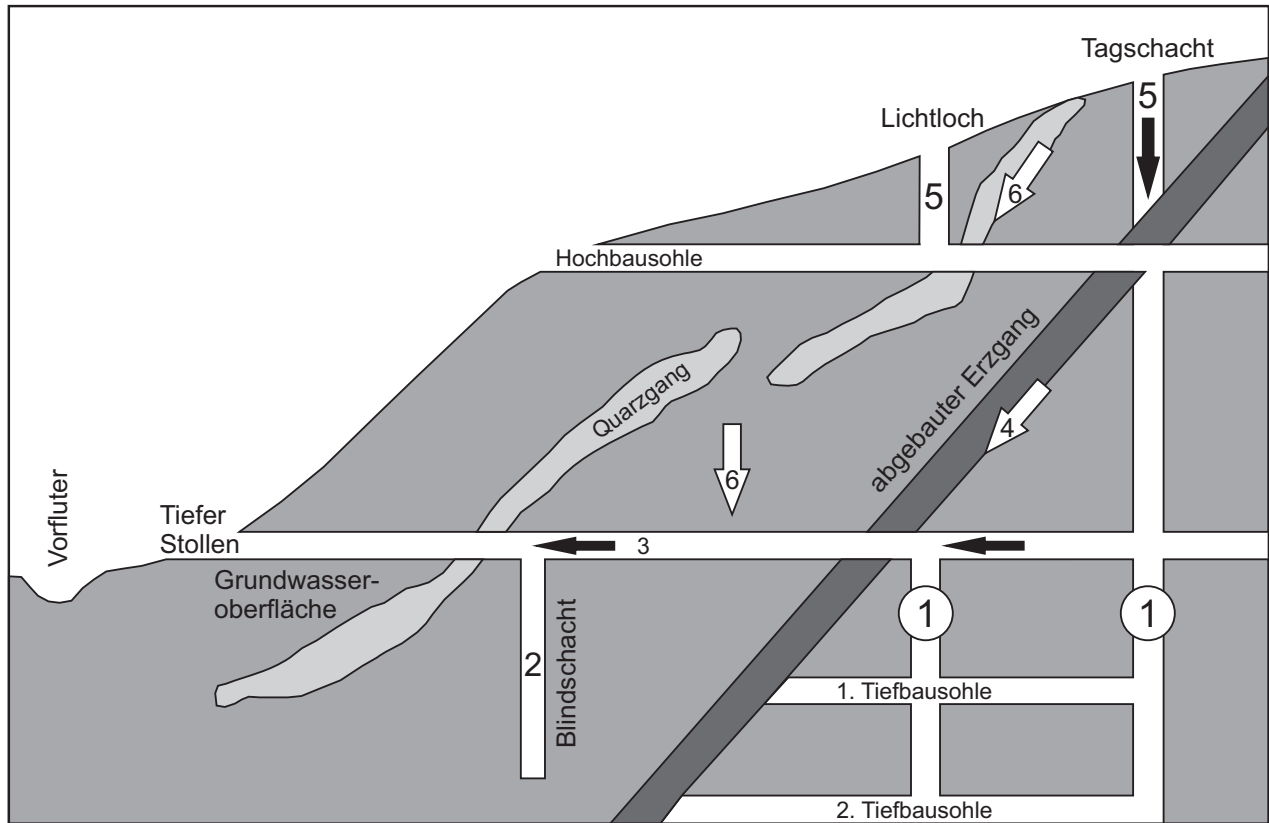


Abb. 6: Hydrogeologie gefluteter Bergwerke (Schemadarstellung ohne Maßstab, WIEBER, 1999).

- Grundwässer:
- (1) Schachtwässer: in gefluteten Stollen und Schächten zirkulierende Grundwässer
 - (2) In Blindschächten eingestaute Grundwässer
 - (3) Über Röschen gefasste Grundwässer [mit (geringem) Tagwasseranteil], die nach außen abgeführt werden.
- Tagwässer:
- (4) Sickerwässer aus Abbaubereichen (ungesättigte Zone)
 - (5) Freie Wasserzutritte aus Schächten und Erzrollen (ungesättigte Zone)
 - (6) Sickerwässer außerhalb der Abbaubereiche (ungesättigte Zone)

Der Grund- bzw. Grubenwasserspiegel (gesättigte Zone) ist in mehreren Tiefschächten (Stephan-, Mittel- und Otto-Wolf-Schacht), einem Blindschacht sowie mehreren Schrägschächten aufgeschlossen. Er befindet sich wenige Meter unterhalb des Niveaus des Adelheid-, Hütten- bzw. Tiefen Stollens der Grube Peter (Abb. 7). Die Verbundgrube entwässert nach Flutung über den Lahnstollen in die Lahn.

Die Stollen oberhalb des Grundwassers führen Wasser der ungesättigten Zone ab. Die Grube Holzappel entwässert über den Adelheid-/Herminenstollen (Abb. 10 bis 11) in die Lahn, die ehemalige Grube Leopoldine-Louise über den Hüttenstollen in den Gelbach. In der angrenzenden Grube Peter wurde keine Entwässerung über den Tiefen Stollen festgestellt, vermutlich wird das Sickerwasser annähernd vollständig verdunstet oder dem Grundwasser zugeführt.

Im Adelheid- und Hüttenstollen wurde eine hydrologische Kartierung durchgeführt. Über die gesamte begehbare Strecke wurden wasserführende Röschen, die das Sickerwasser aus dem Bergwerk nach außen abführen, angetroffen. Im Adelheidstollen ist die Rösche bis zum Abbiegen in die Gangstrecke unterhalb der Stollensohle als eigener Stollen mit Natursteingewölbe ausgebaut, über den das Sickerwasser nach außen abgeführt wird. Die Stollensohle weist ca. 20 Einbrüche der Firste der Rösche auf. Die Rösche ist in den Gangstrecken des Ost- und Hauptfeldes weitgehend als betonierte Rinne mit Rechteckprofil ausgebaut.

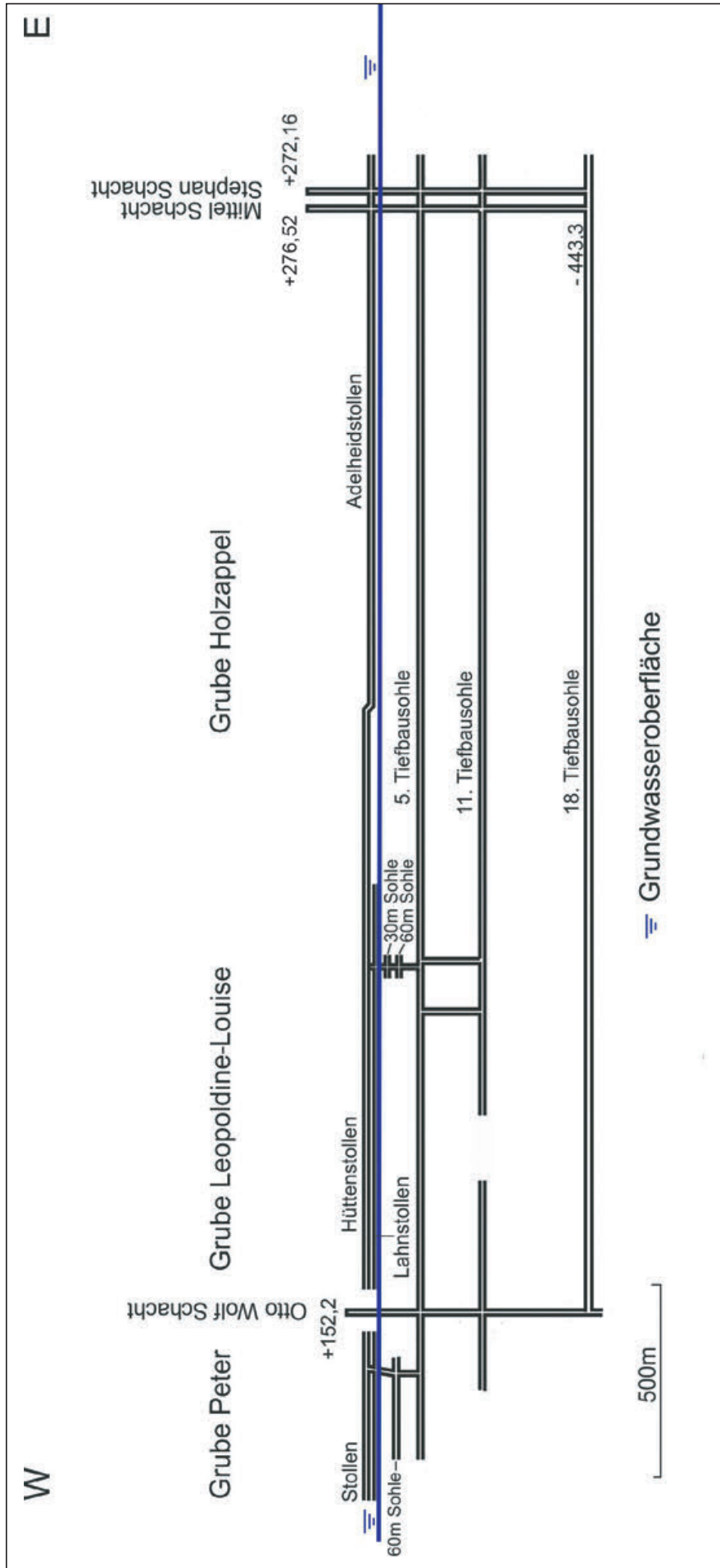


Abb. 7: Saigerriß der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter, Untere Lahn-Revier mit Darstellung des Grundwasserspiegels (abgeändert und ergänzt auf Grundlage von HERBST, 1969).

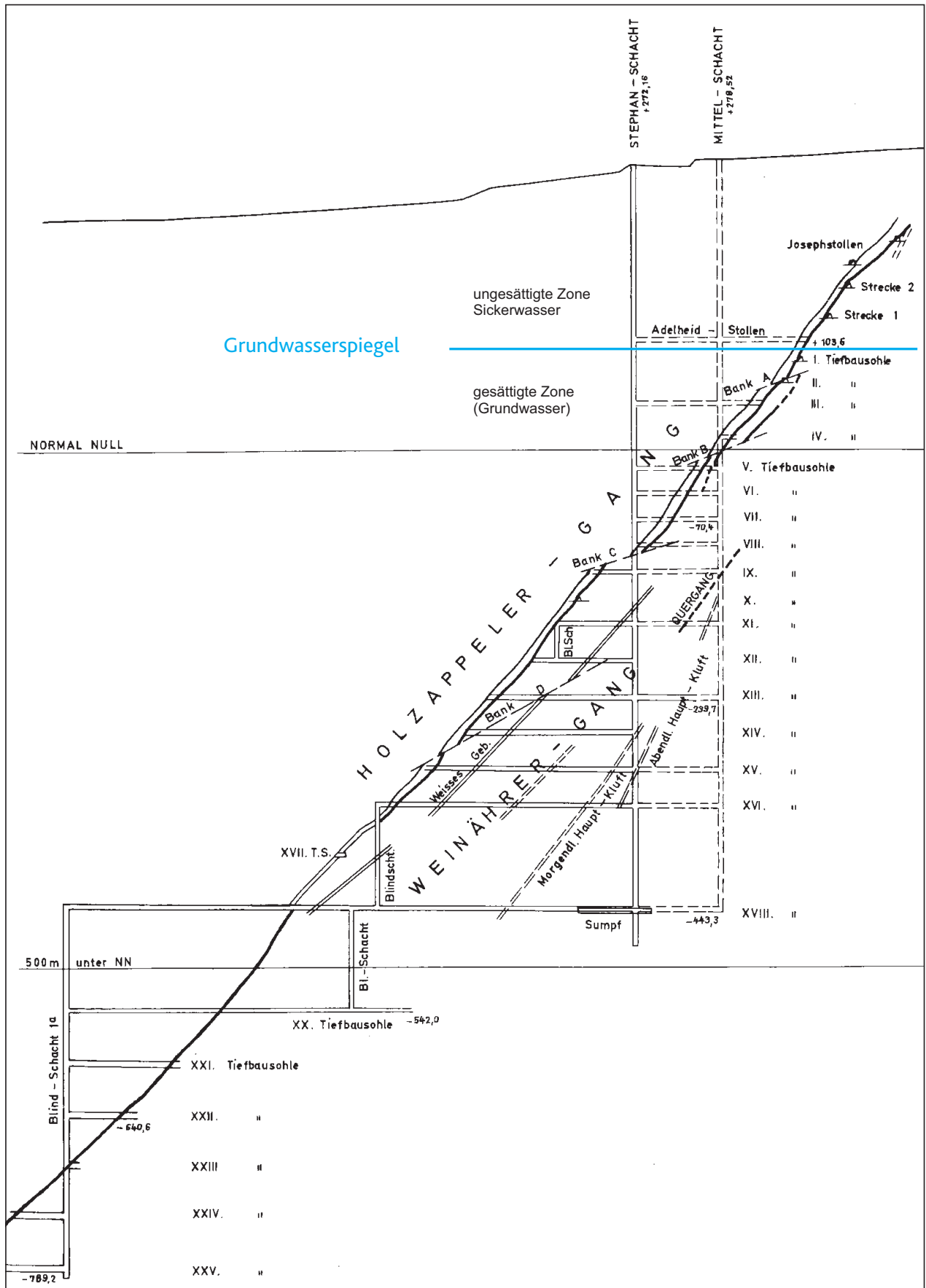


Abb. 8: Hydrogeologischer Saigerriss der Grube Holzappel durch Stephan- und Mittelschacht (ergänzt auf Grundlage SCHÖPPE, 1911)



Abb. 9: Rösche im Untere Lahn-Revier.

5.1 Grundwasserneubildung

Abflussmessungen wurden über einen Zeitraum von 1,5 Jahren am Herminenstollen (ungesättigte Zone) und am Lahnstollen (gesättigte Zone) durchgeführt und ausgewertet.

Der Herminenstollen befindet sich in Laurenburg unmittelbar westlich neben dem Gebäudebestand des Pflegeheims (Abb. 10). Der Lahnstollen entwässert ca. 1 km nordöstlich von Obernhof deutlich sichtbar in die Lahn (Abb. 1, 3 und 12). Alle Stollen unter dem Niveau des Adelheid-/Hüttenstollens sind mit Grundwasser eingestaut (Abb. 7 und 8). Der Lahnstollen stellt die Hauptentwässerung (Erbstollen) der gesamten grundwassererfüllten Grube in die Lahn dar. Die höheren Stollen wie Adelheid- und Hüttenstollen sowie die gesamten Hochbausohlen führen „nur“ Sickerwasser der ungesättigten Zone ab.

Etwa 200 m bergseits des Stollenmundloches des Adelheidstollens (Abb. 10) verlässt die Rösche den Adelheidstollen und wird als selbstständiger Stollen (Wasserabfluss- oder Herminenstollen) weitergeführt (Abb. 11). Der Adelheidstollen führt Sickerwasser (ungesättigte Zone) ab, welches zu einem großen Anteil aus den Abbaubereichen des Erzbergbaus stammt. Im Adelheidstollen sind über weite Strecken keine Sickerwasserzutritte von den Firten oder den Wänden festzustellen. Andererseits kommen an tektonischen Auflockerungszonen Zuflüsse größerer Wassermengen vor. Diese gehen häufig mit Sinterbildungen einher (Abb. 10). Messungen der Schüttungen/Abflüsse am Auslauf des Lahn- und Herminenstollens wurden an 15 Stichtagen zwischen dem 17.05.2014 und dem 17.09.2015 durchgeführt (Tab. 2). Graphisch sind die Ergebnisse in Abb. 13 und 14 dargestellt. Deutlich erkennbar sind Änderungen der Schüttungen vom hydrologischen Winter- (2014/15) zum Sommerhalbjahr (2014 und 2015).

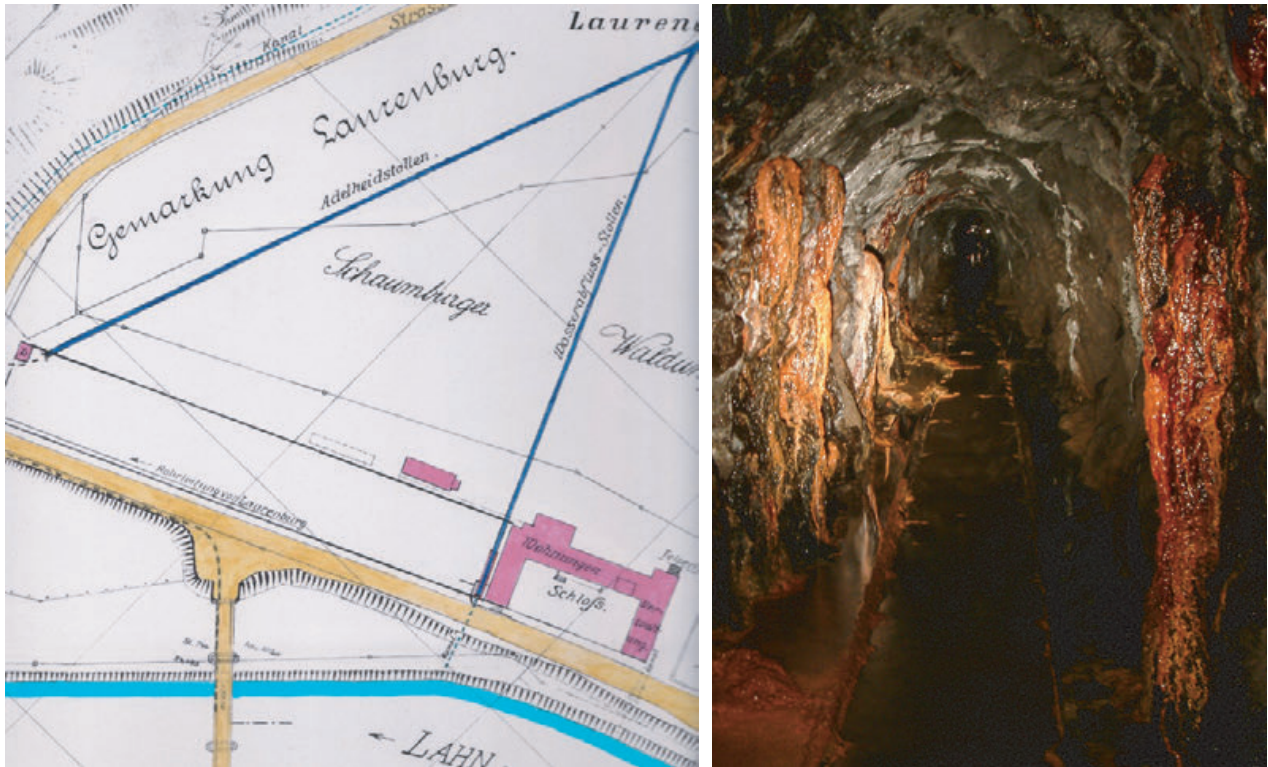


Abb. 10: Grundriss des Herminenstollens [=Wasserabfluss-Stollen] (aus Archiv des Bergbaumuseums Bad Ems, links); Sickerwasseraustritt im Adelheidstollen mit Sinterbildungen (rechts).

Tab. 2: Ergebnisse der Stichtagsmessungen der Schüttungen am Herminen- und Lahnstollen

Stollen	Datum	Schüttung (l/s)	Stollen	Datum	Schüttung (l/s)
Herminenstollen	17.05.2014	1,3	Lahnstollen	17.05.2014	10,0
	03.10.	1,05		03.10.	11,5
	18.10.	1,3		18.10.	12,5
	09.11.	1,4		09.11.	14,5
	20.12.	2,0		20.12.	15,0
	20.01.2015	2,0		20.01.2015	15,3
	28.03.	1,6		28.03.	15,6
	10.04.	1,6		10.04.	15,7
	04.05.	1,7		04.05.	15,4
	23.05.	1,6		23.05.	16,0
	16.06.	1,4		16.06.	14,7
	02.07.	1,6		02.07.	11,8
	01.08.			01.08.	11,8
	06.08.	1,5		06.08.	10,8
	17.09.	1,2		17.09.	10,7



Abb. 11: Stollenmundloch des Herminenstollens (oben) und Blick in den Stollen (unten).



Abb. 12: Blick in den Lahnstollen (oben) und Schüttungsmessung am Auslauf des Lahnstollens (unten).

Beim Herminenstollen wurden im Winterhalbjahr Abflüsse bis 2,0 l/s gemessen, im Sommerhalbjahr nahmen sie auf bis 1,05 l/s ab (Abb. 14).

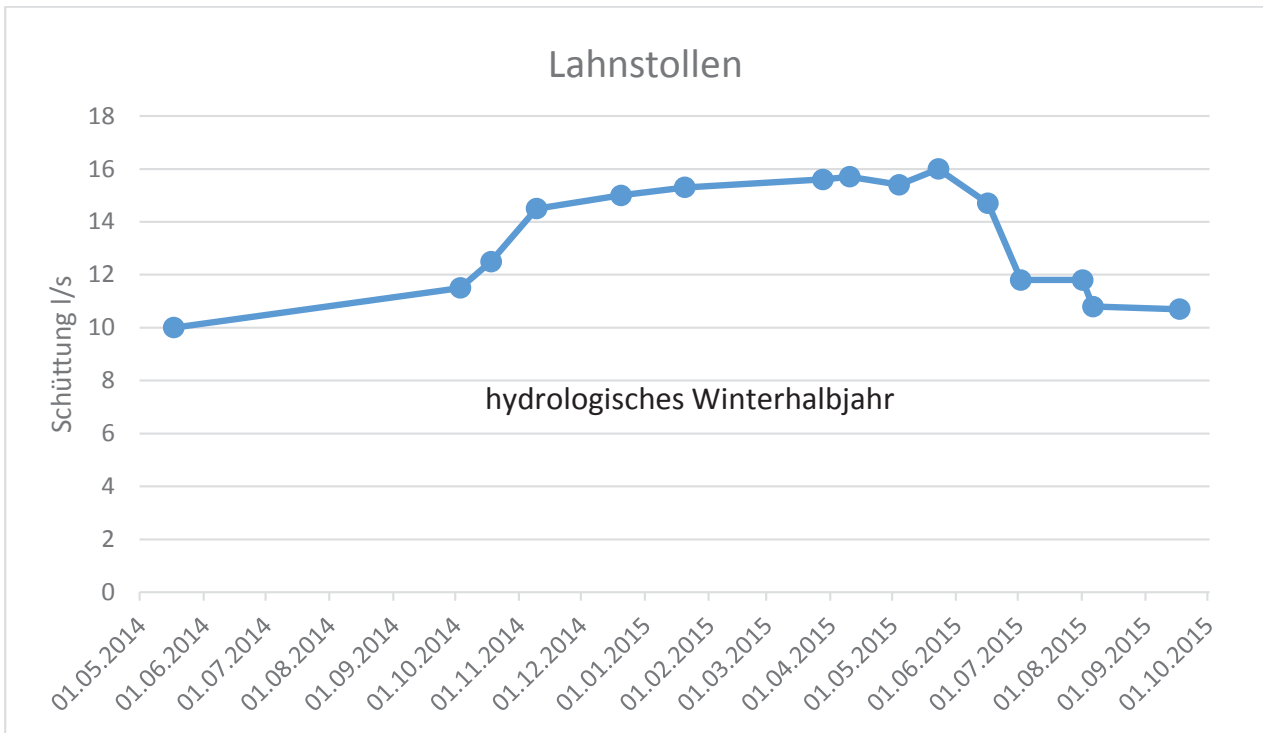


Abb. 13: Schüttung (l/s) am Auslauf des Herminenstollens.

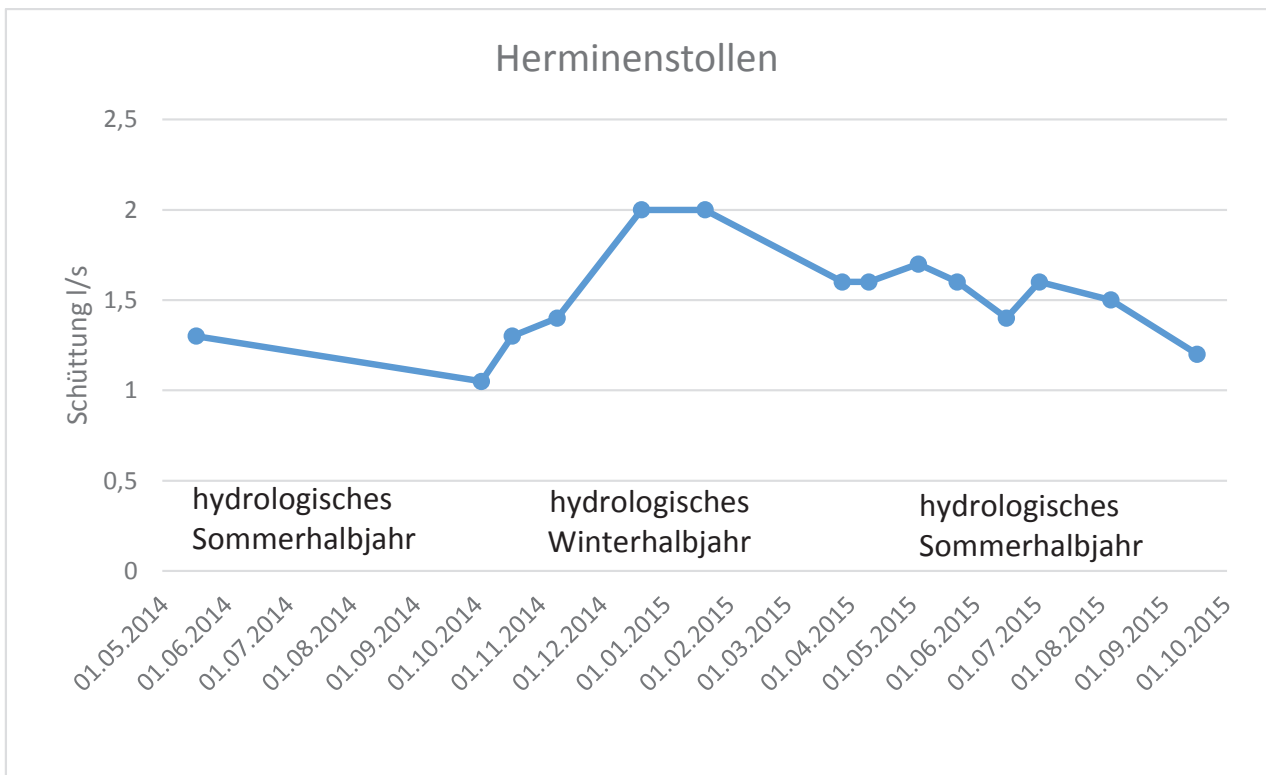


Abb. 14: Schüttung (l/s) am Auslauf des Herminenstollens.

Ein ähnliches Bild der Abflüsse wie im Herminenstollen liefert die Auswertung des Lahnstollens (Abb. 13) mit gemessenen Werten bis 16 l/s (hydrologisches Winterhalbjahr) und bis 10,0 l/s (hydrologisches Sommerhalbjahr). Diese Unterschiede sind auf die fehlende bis nur sehr geringe Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr infolge der Pflanzenverdunstung sowie

die erhöhte Grundwasserneubildung im Winter infolge geringer Pflanzenverdunstung zurückzuführen. Nach HERBST (1969) betrug die Schüttung des Lahnstollens während der aktiven Phase mit zunehmender Teufe ständig $3,0 \text{ m}^3/\text{min}$ entsprechend 50 l/s . Nach 1952 entwässerte der Lahnstollen das geflutete Grubengebäude mit ständig $1,6 \text{ m}^3/\text{min}$ entsprechend $26,7 \text{ l/s}$ (HERBST 1969). Allerdings ist davon auszugehen, dass die Grundwasserneubildung bei fehlendem Bewuchs, wie auf nicht rekultivierten Bergbauflächen üblich, deutlich höher war als heute, wo ehemals nahezu unbewachsene Bergbauareale wieder in Natur und Landschaft integriert sind. HERBST (1969) gibt das Einzugsgebiet mit $2.500 \text{ m} \times 3.500 \text{ m}$ (entsprechend $8,75 \text{ km}^2$) an.

Die Auswertung des aktuellen Höhenmodells ergab ein kleinräumiges oberirdisches Einzugsgebiet über der gefluteten Grube Holzappel – Leopoldine-Louise von ca. $4,7 \text{ km}^2$ (Abb. 15). Das gesamte oberirdische Einzugsgebiet besitzt jedoch eine größere Ausdehnung in Richtung NNE. Erfahrungsgemäß ist in der Region mit einer Grundwasserneubildung von 80 bis 120 mm/a zu rechnen. Dies entspricht – bei Annahme eines Mittelwertes von ca. 100 mm/a für die Neubildung und einem Einzugsgebiet von ca. $4,7 \text{ km}^2$ – $14,9 \text{ l/s}$ und liegt damit in der Größenordnung der festgestellten Schüttungen (Summe Herminenstollen und Lahnstollen).

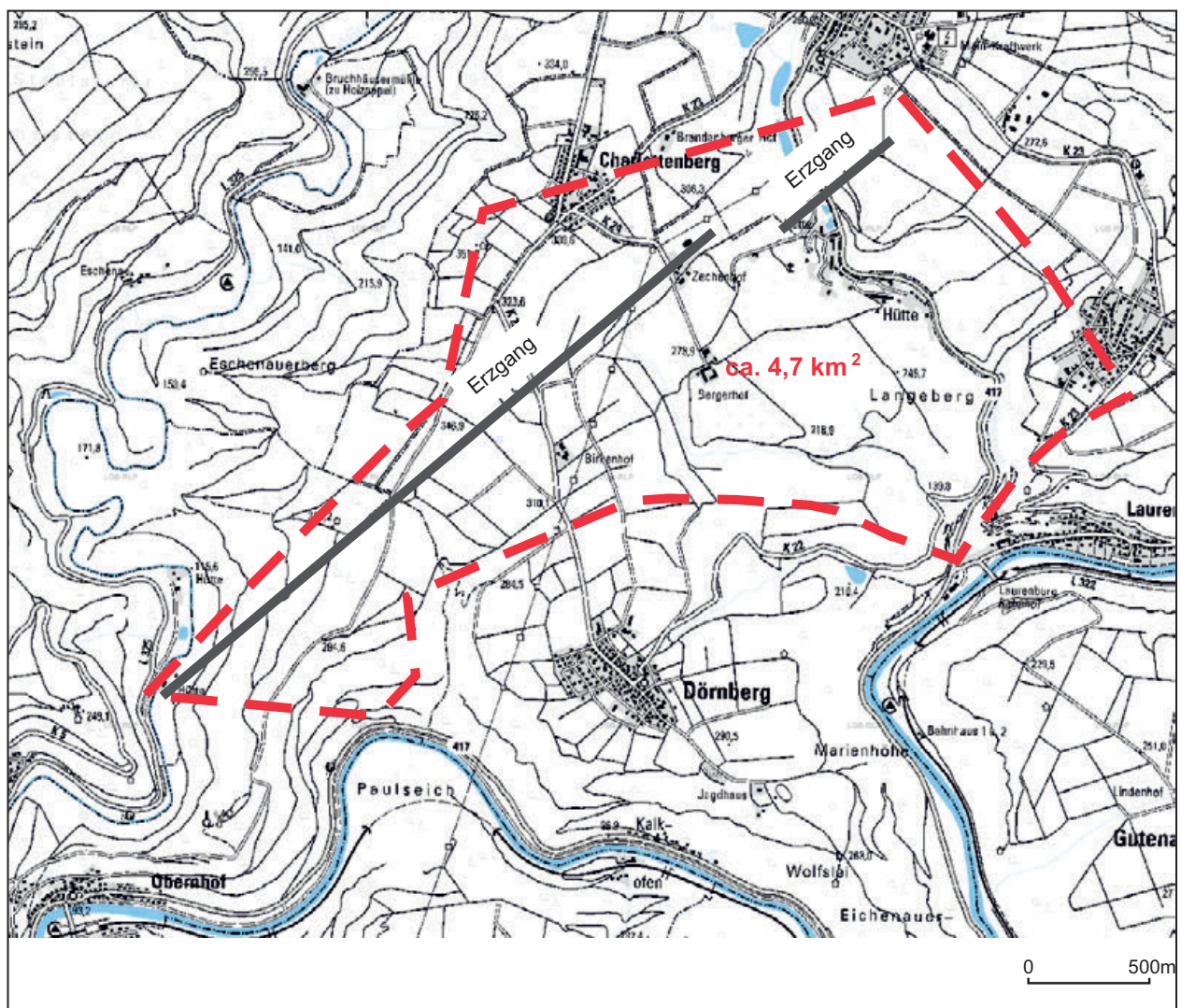


Abb. 15: Skizze des oberirdischen Einzugsgebietes der Grube Holzappel.

5.2 Hydrochemische Beschaffenheit der Grubenwässer

Als Grubenwässer werden im Rahmen dieser Arbeit alle Wässer definiert, die in den Gruben bauen zirkulieren und aus diesen abströmen. In Anlehnung an WIEBER (1999) lässt sich für geflutete Grubenbaue des Erzbergbaus an der Unteren Lahn folgende Systematik/Nomenklatur entwickeln:

Gruben-/Tagwässer der ungesättigten Zone (Sickerwässer):

- Sickerwässer aus Abbaubereichen
- Sickerwässer außerhalb von Abbaubereichen
- Freie Wasserzutritte aus Schächten und Erzrollen
- Röschenwässer der ungesättigten Zone, die sich aus unterschiedlichen Anteilen der zuvor genannten Sickerwässer zusammensetzen.

Grubenwässer der gesättigten Zone:

- In Tiefschächten zirkulierende Grundwässer (Schachtwässer)
- In gefluteten Tiefbausohlen zirkulierende Grundwässer
- In Blindschächten und Erzrollen eingestaute Grundwässer
- Über Tiefe Stollen oder Erbstollen abfließende Grubenwässer der gesättigten Zone
- In gefluteten Abbaubereichen zirkulierende Grundwässer
- In ungestörten devonischen (Sediment-) Gesteinen zirkulierende Grundwässer.

Tab. 3: Grubenwasseraufschlüsse und Probenahmestellen.

Herkunft	Name der Grube	Ort der Probenahme	Art des Grubenwassers	Bemerkungen	
Ungesättigte Zone (Sickerwasser)	Holzappel	Adelheid- und Herminenstollen	Röschen	WIEBER (1999, 2015) WENZEL (2015)	
	Leopoldine-Louise	Hüttenstollen		WIEBER (1999)	
Gesättigte Zone (Grundwasser)	Holzappel	Mittelschacht	Tiefschächte:	WIEBER (1999, 2015) WENZEL (2015) BREUER & MAYER (2014)	
		Stephanschacht			Grubenwasser gesättigte Zone
	Leopoldine-Louise	Otto-Wolf-Schacht mit deutlichem CO ₂ -Aufstieg (Blasen)			
	Holzappel	Schrägschacht Ostfeld	Rollen und Schrägschächte:		WIEBER (1999) WENZEL (2015) WIEBER (2015/16)
		Schrägschacht Hauptfeld			
	Blindschacht (Hauptfeld)	Grubenwasser gesättigte Zone			
Grube Peter	Schrägschacht		WIEBER (1999, 2015) BREUER & MAYER (2014) WENZEL (2015)		

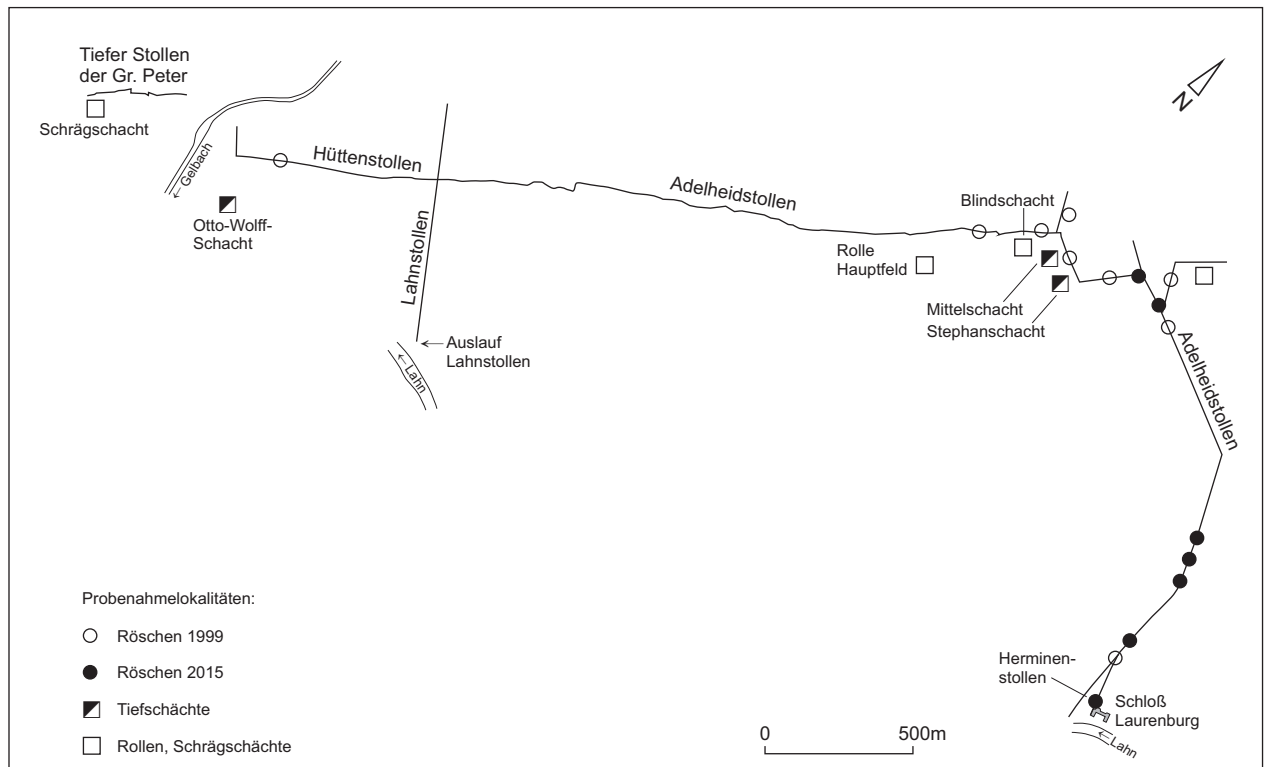


Abb. 16: Lageplan mit Probenahmestellen der Grubenwässer.

Die Beschreibung der physiko-chemischen Beschaffenheit der Grubenwässer basiert auf verschiedenen Untersuchungen (Tab. 3) differenziert nach ihrer Beschaffenheit und hydrogeologischen Zuordnung (gesättigte-/ungesättigte Zone). Die Probenahmestellen sind in Lageplänen (Abb. 16) dokumentiert.

5.2.1 Grubenwässer der ungesättigten Zone

Die Röschen des Hütten- und Adelheidstollens führen die Wässer der ungesättigten Zone der Gruben Leopoldine-Louise (Hüttenstollen) - Holzappel (Adelheidstollen) nach über Tage ab. Etwa 200 m vor dem Stollenmundloch des Adelheidstollens zweigt der Herminenstollen (Abb. 10 und 16) ab und entwässert in die Lahn. Hydrochemische Untersuchungen der Röschenwässer des Herminen-, Adelheid- und Hüttenstollens wurden von WIEBER (1999), WENZEL (2015) und WIEBER (2015) durchgeführt. Für die ungesättigte Zone wird die Beschreibung auf die in Röschen abfließenden Wässer beschränkt, da diese Mischwässer sich aus Sickerwasserarten unterschiedlicher Herkunft zusammensetzen und somit den Abfluss mittlerer physiko-chemischer Beschaffenheit repräsentieren.

Die Wässer (Tab. 5) wiesen bei den Probenahmen Temperaturen zwischen 9,5 °C und 13,0 °C und eine elektrische Leitfähigkeit von 419 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bis 746 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Lokal sind die Röschenwässer in Gangbereichen stärker mineralisiert (bis 1075 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Die Wässer sind überwiegend durch annähernd neutrale bis schwach alkalische pH-Werte charakterisiert. Die Sauerstoffgehalte wurden mit Werten zwischen 4,52 und 11,9 mg/l bestimmt. Die gemessenen Redox-Potentiale betragen bezogen auf die Normal-Wasserstoffelektrode meist über 400 mV (ein Ausreißer: 293 mV).

Tab. 4: Vor-Ort-Parameter der Röschenwässer der ungesättigten Zone der Gruben Holzappel und Leopoldine-Louise. Erläuterungen: 1. Temperatur (°C), 2. elektr. Leitfähigkeit (µS/cm), 3. pH-Wert, 4. Redox-Potential kor. (mV), 5. Sauerstoff (mg/l), (x): Anzahl der Proben

Röschen	Parameter	WIEBER (1999)	WENZEL (2015)	WIEBER (2015)
Adelheidstollen (Abbaubereich bis Abzweig Herminenstollen)	1.	10,2 – 12,7 (15)	11,3 – 12,1 (4)	siehe WENZEL (2015)
	2.	568 – 1075 (15)	736 – 746 (4)	
	3.	7,0 – 7,9 (15)	6,53 – 7,26 (4)	
	4.	436 – 490 (15)	293 – 490 (4)	
	5.	7,4 – 9,0 (15)	8,37 – 11,9 (4)	
Herminenstollen	1.	keine Untersuchung	10,7 - 12,8 (3)	10,7 – 13,0 (7)
	2.		629 – 696 (3)	629 – 696 (7)
	3.		6,40 – 7,48 (3)	6,40 – 7,98 (7)
	4.		442 – 511 (3)	384 – 506 (7)
	5.		4,52 – 8,74 (3)	4,52 – 8,74 (7)
Adelheidstollen Hauptfeld	1.	keine Untersuchung	10,6 (1)	siehe WENZEL (2015)
	2.		507 (1)	
	3.		7,34 (1)	
	4.		546 (1)	
	5.		7,83 (1)	
Hüttenstollen	1.	9,5 (1)	keine Untersuchung	keine Untersuchung
	2.	419 (1)		
	3.	8,1 (1)		
	4.	442 (1)		
	5.	6,0 (1)		

Die Analysen der Hauptkationen und –anionen zeigen ähnliche Zusammensetzungen. Dominiert werden die Kationen durch Erdalkalien (Abb. 17 und 19). Bei den Lösungsinhalten fällt die Probe Hauptfeld (Adelheidstollen) durch geringere Werte auf (Abb. 18). Diese sind, wie bei Befahrungen festgestellt wurde, auf hohe Zuflüsse von gering mineralisierten Oberflächenwässern zurückzuführen. Die gesamte Lösungsfracht (TDS) beträgt nur ca. 250 mg/l, während die übrigen Proben Gehalte über 340 mg/l aufweisen (Abb. 18). Die Anionen werden durch Sulfat dominiert (Abb. 17). Das Sulfat resultiert überwiegend aus der Verwitterung der primär sulfidhaltigen Erze bzw. Lösung der sulfathaltigen Verwitterungsbildungen (Gips, Jarosit, Buntmetallsulfate etc.).

Auffallend ist bei den Anionen, dass sich die Verhältnisse von Hydrogencarbonat zu Sulfat von 1999 zu 2015 von einer deutlichen Sulfatdominanz (um 70 ceq-%; WIEBER, 1999) zu annähernd gleichen Anteilen verändert haben (50-60 ceq-%; WENZEL, 2015; WIEBER, 2015). Möglicherweise deutet dies auf eine Trendumkehr der hydrochemischen Beschaffenheit der Sickerwässer durch eine bereits erhebliche Abnahme der gut wasserlöslichen sulfatischen Verwitterungsminerale in der ungesättigten Zone hin. Die Sicker- und Röschenwässer zeigen einen deutlichen anthropogenen Einfluss durch Nitrat. WENZEL (2015) hat NO₃-Gehalte bis 38 mg/l festgestellt (Hauptfeld Adelheidstollen).

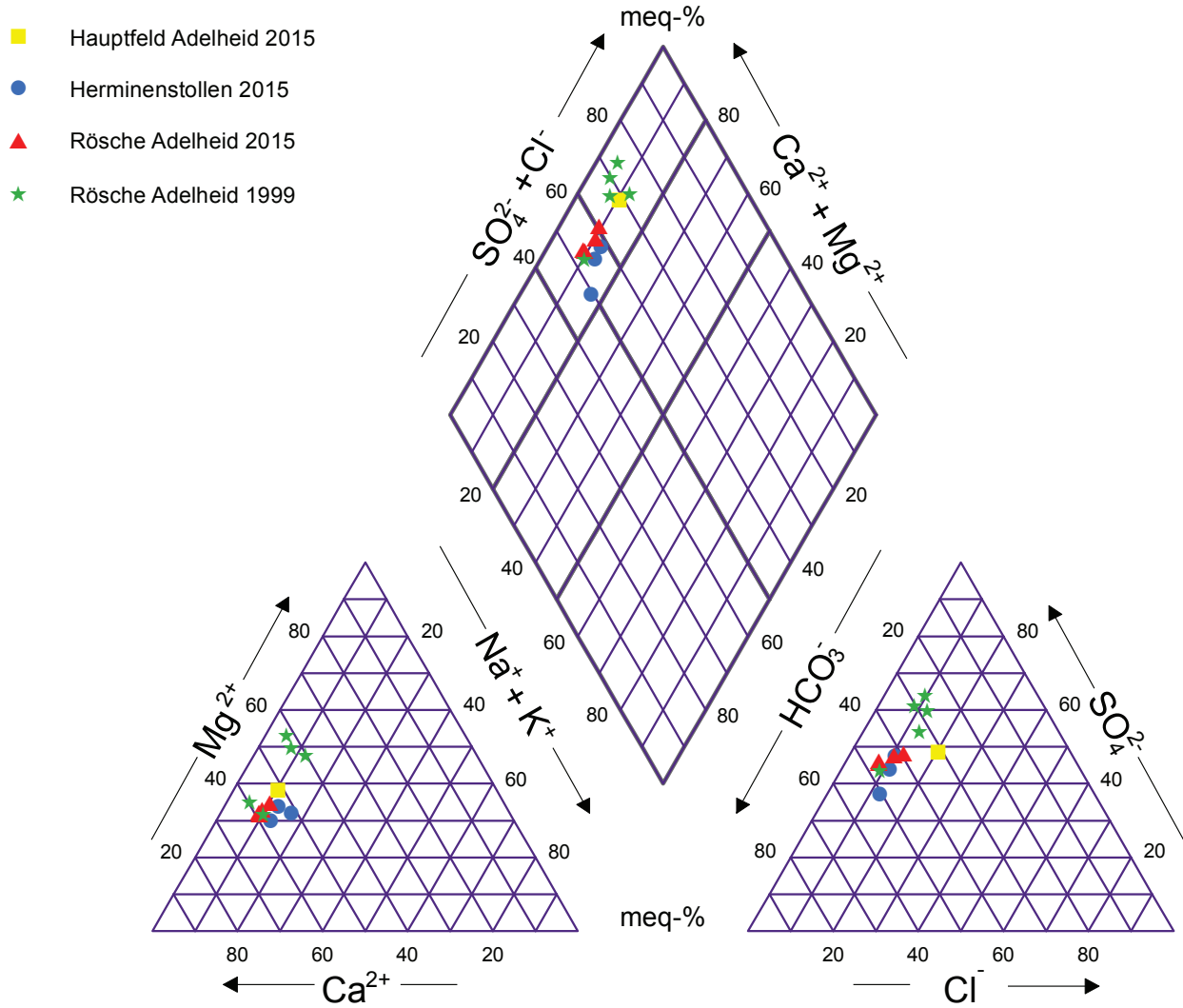


Abb. 17: Piper-Diagramm der chemischen Beschaffenheit der Röschenwässer der Grube Holzappel.

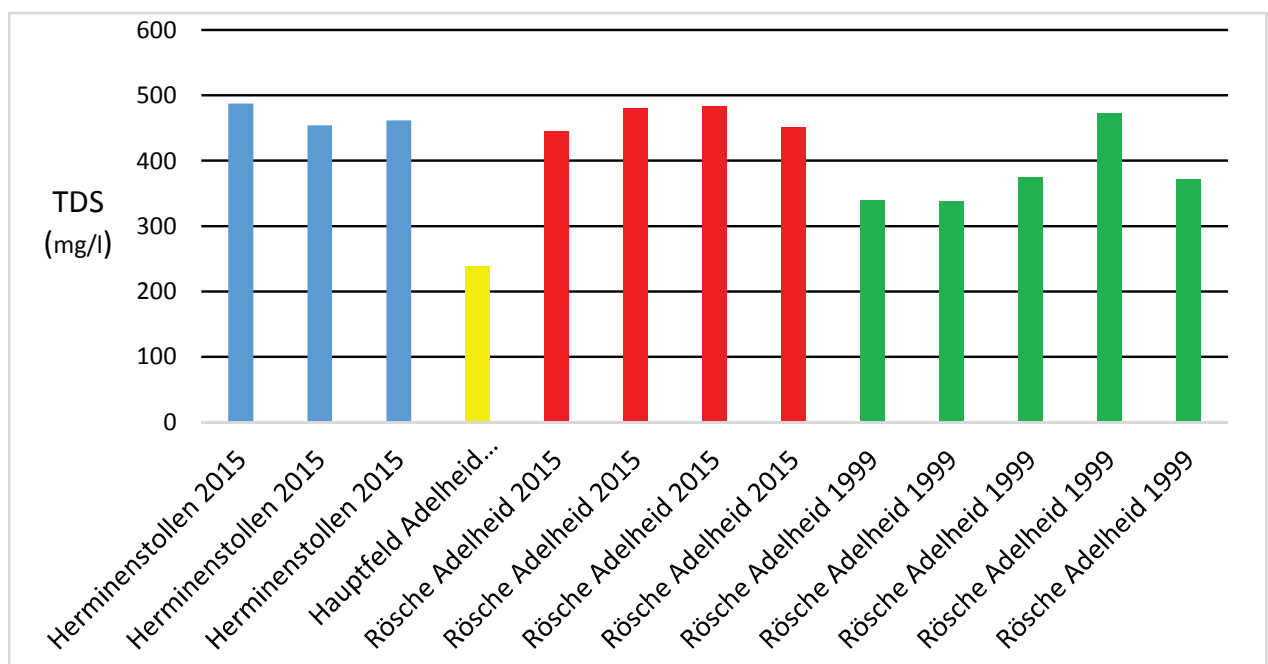


Abb. 18: Gesamtlösungsfracht (TDS) der Röschenwässer Grube Holzappel, Untere Lahn.

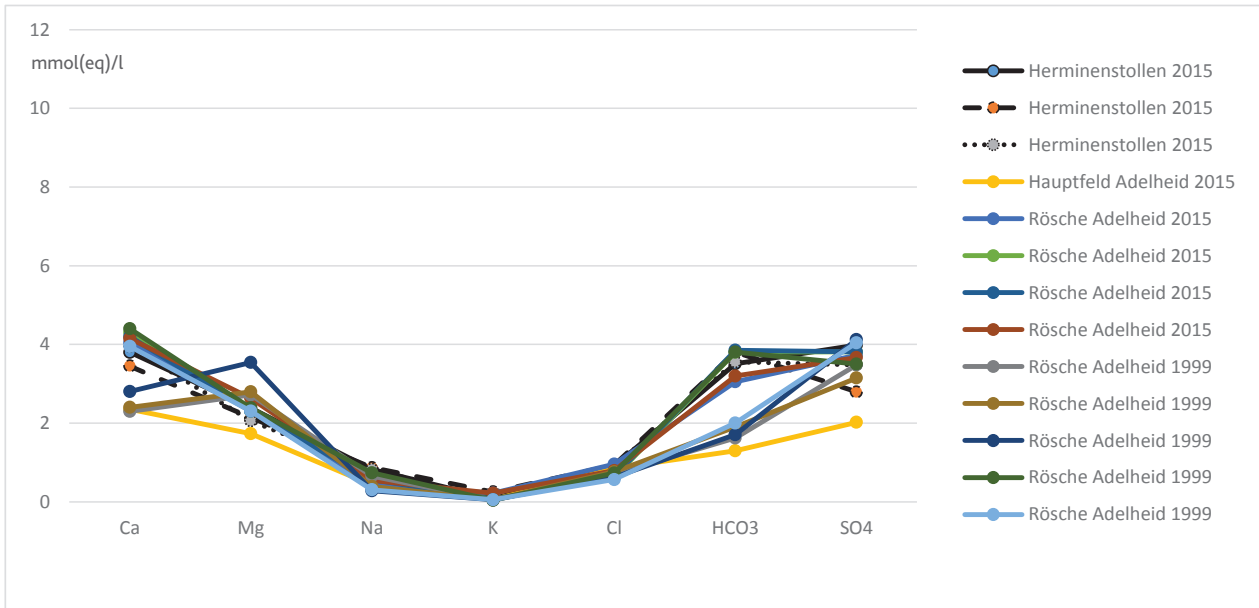


Abb. 19: Schoeller-Diagramme der Röschenwässer Grube Holzappel, Untere Lahn (Angaben in mmol(eq)/l).

5.2.2 Grubenwässer der gesättigten Zone

Das Grundwasser steht unter dem Niveau des Adelheid- bzw. Hütten- bzw. Tiefen Stollens der Grube Peter an und ist nur an wenigen Stellen aufgeschlossen. Die Wasseraufschlüsse und Probenahmen sind in der Abbildung 16 und Tabelle 4 dargestellt.

Bereits die vor-Ort-Parameter (Tab. 5) zeigen, dass Wässer mit deutlichen hydrochemischen Unterschieden ausgebildet sind.

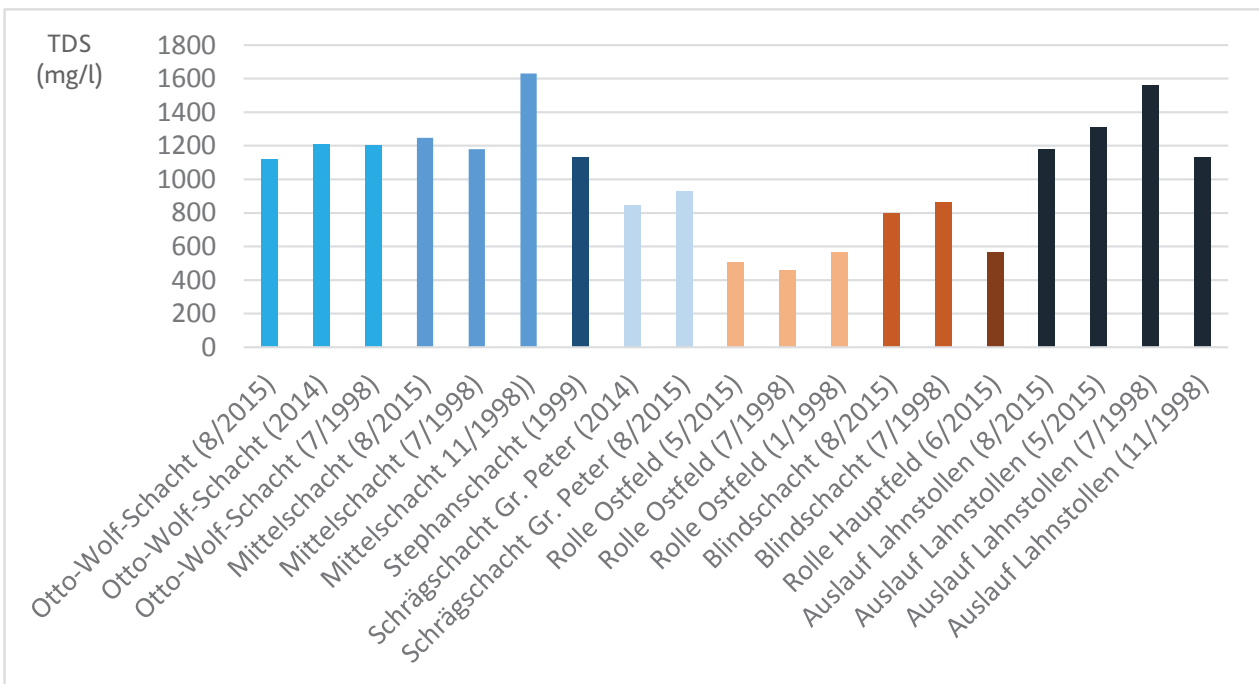


Abb. 20: Gesamtlösungsfracht (TDS) der Grundwässer Grube Holzappel, Untere Lahn.

Tab. 5: Vor-Ort-Parameter der Grubenwässer der gesättigten Zone der Gruben Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter. Erläuterungen: 1. Temperatur (°C), 2. elektr. Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$), 3. pH-Wert, 4. Redox-Potential kor. (mV), 5. Sauerstoff (mg/l), (x): Anzahl der Proben

Lokation	Parameter	WIEBER (1999)	BREUER & MAYER (2014)	WENZEL (2015)	WIEBER (2015)
Mittelschacht	1. 2. 3. 4. 5.	17,1-20,2 (11) 1179-1670 (11) 6,7 (11) 227-307 (11) 1,2-1,9 (5)	Keine Untersuchung	18,1 (1) 1247 (1) 6,75 (1) 161 (1) 2,1 (1)	siehe WENZEL
Stephanschacht	1. 2. 3. 4. 5.	19,4 (1) 1133 (1) 6,8 (1) 217 (1) 1,5 (1)	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung
Otto-Wolf-Schacht	1. 2. 3. 4. 5.	18,2 (1) 1201 (1) 6,7 (1) 239 (1) 1,1 (1)	14,7 (1) 1212 (1) 6,77 (1) 214 (1) 1,60 (1)	16,8-17,4 (2) 1119-1224(2) 6,65-6,81 (2) 261-470 (2) 1,31-6,88 (2)	siehe WENZEL
Schrägschacht Grube Peter	1. 2. 3. 4. 5.	Keine Untersuchung	14,4 (1) 849 (1) 7,07 (1) 205 (1) 2,98 (1)	15,5 (1) 931 (1) 6,64 (1) 326 (1) 8,28 (1)	siehe WENZEL
Rolle Ostfeld Grube Holzappel	1. 2. 3. 4. 5.	11,7-12,0 (2) 461-569 (2) 7,1-7,2 (2) 386-396 (2) 5,9-5,3 (2)	Keine Untersuchung	11,1-11,2 (2) 506-593 (2) 7,21-7,28 (2) 282-461 (2) 4,55-7,80 (2)	siehe WENZEL
Bindschacht Hauptfeld Grube Holzappel	1. 2. 3. 4. 5.	13,4 (1) 865 (1) 7,9 (1) 147 (1) 3,7 (1)	Keine Untersuchung	12,5 (1) 801 (1) 6,71 (1) 177 (1) 2,08 (1)	siehe WENZEL
Rolle Hauptfeld Grube Holzappel	1. 2. 3. 4. 5.	Keine Untersuchung	Keine Untersuchung	11,0 (1) 566 (1) 7,02 (1) 477 (1) 5,30 (1)	siehe WENZEL
Lahnstollen (Auslauf)	1. 2. 3. 4. 5.	18,3-20,6 (2) 1133-1559 (2) 7,0-7,3 (2) 145-227 (2) 7,1 (1)	Keine Untersuchung	20,3-20,4 (2) 1180-1311 (2) 7,07-7,15 (2) 198-241 (2) 3,66-4,40 (2)	18,9-20,7 (6) 1180-1404 (6) 6,91-7,15 (6) 182-268 (6) 2,58-4,40 (6)

Auf der einen Seite stehen die in den Tiefschächten zirkulierenden Grundwässer und auf der anderen Seite die in Erzrollen und Blindschächten geringer Teufe aufgeschlossenen Grubenwässer. Hinsichtlich der hydrochemischen Beschaffenheit ist der Schrägschacht der Grube Peter eher den Tiefstollen zuzuordnen (Abb. 21.1 und 21.2), während die Messwerte für die elektrische Leitfähigkeit und TDS deutlich geringer sind (Abb. 20). Die Wässer der Tiefschächte zeigen höhere Temperatur (i.d.R. >17°C), erhöhte elektrische Leitfähigkeiten (>1100 µS/cm), niedrigere Redoxpotentiale, geringe Sauerstoffgehalte (< 2,0 mg/l) sowie (annähernd) neutrale pH-Werte. Dem stehen die Wässer der Rollen und flachen Schräg-/Blindschächte gegenüber mit niedrigeren Temperaturen, geringerer Mineralisation und höheren Sauerstoffgehalten.

Auch bei den Hauptkationen und –anionen bestehen erhebliche Unterschiede. Die Grubenwässer aus den Tiefschächten, dem Lahnstollen sowie eingeschränkt des Schrägschachtes der Grube Peter plotten im Piper Diagramm nahe beieinander (Abb. 21.1 und 21.2). Sie unterscheiden sich von den anderen Grundwässern durch deutlich höhere Natriumanteile einhergehend mit geringeren Calciumgehalten (Abb. 21.1, 21.2 und 22.1, 22.2) sowie einer deutlichen Dominanz von Hydrogencarbonat bei den Anionen (>75 eq-%). Ein deutlicher Einfluss durch anthropogen beeinflusste Sickerwässer zeigt sich in den Grundwässern der Erzrollen durch Nitratgehalte bis 32 mg/l (WENZEL, 2015). Hingegen ist in den in den Tiefschächten zirkulierenden sowie den über den Lahnstollen abfließenden Wässern Nitrat nicht oder nur in Spuren nachzuweisen (WENZEL, 2015).

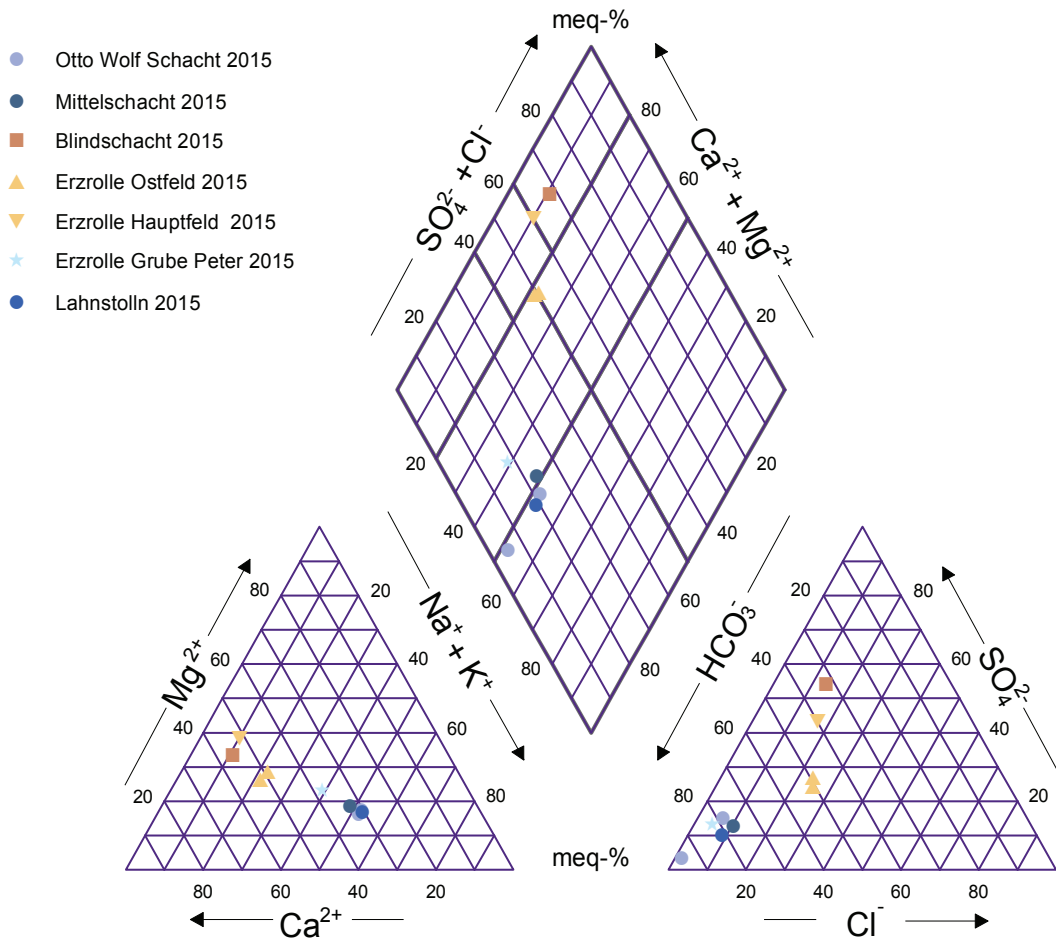


Abb. 21.1: Piper-Diagramm der Grubenwässer der gesättigten Zone der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter (Datengrundlage WIEBER, 2015).

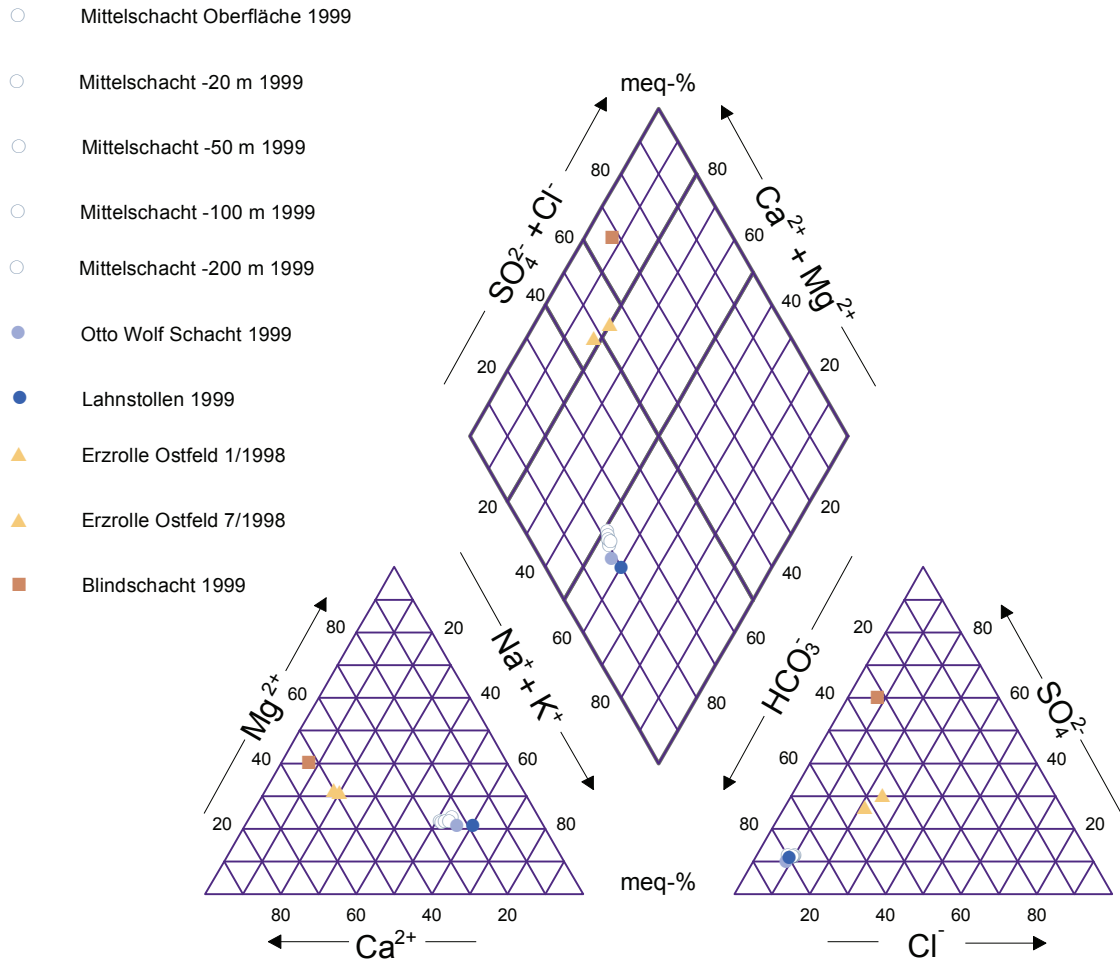


Abb. 21.2: Piper-Diagramm der Grubenwässer der gesättigten Zone der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter (Datengrundlage WIEBER, 1999).

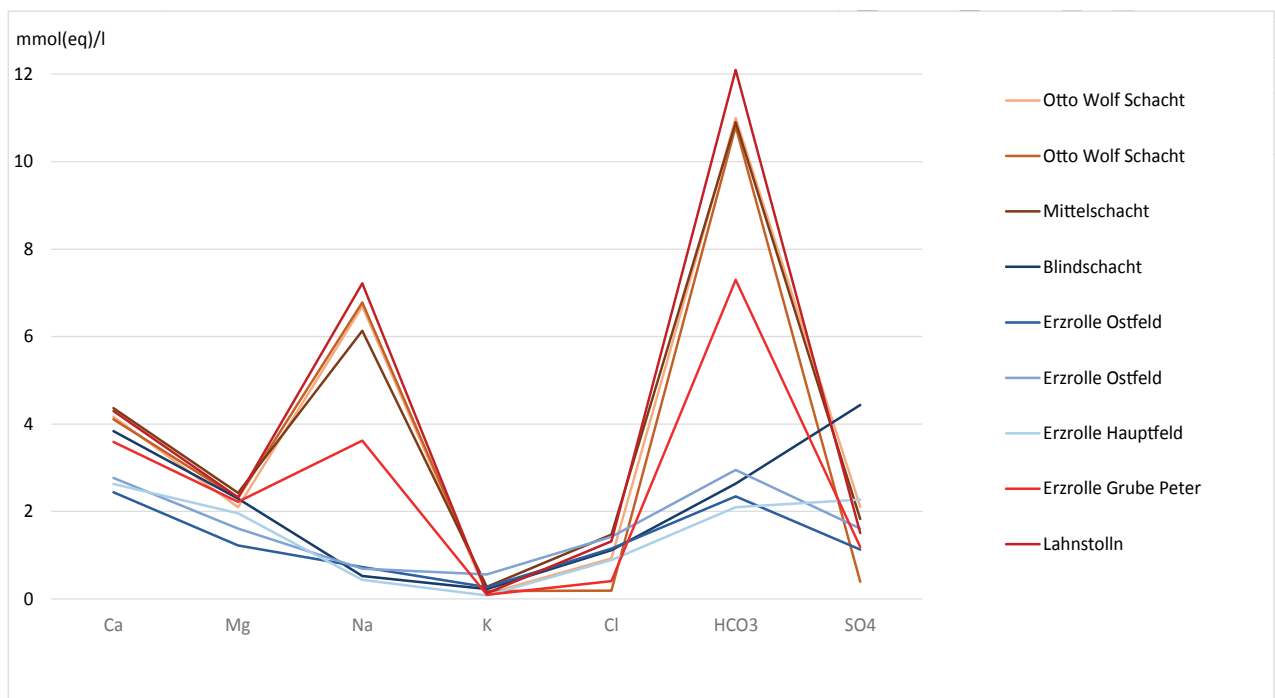


Abb. 22.1: Schoeller-Diagramm der Grubenwässer der gesättigten Zone der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine – Louise – Peter (Untersuchungen 2015).

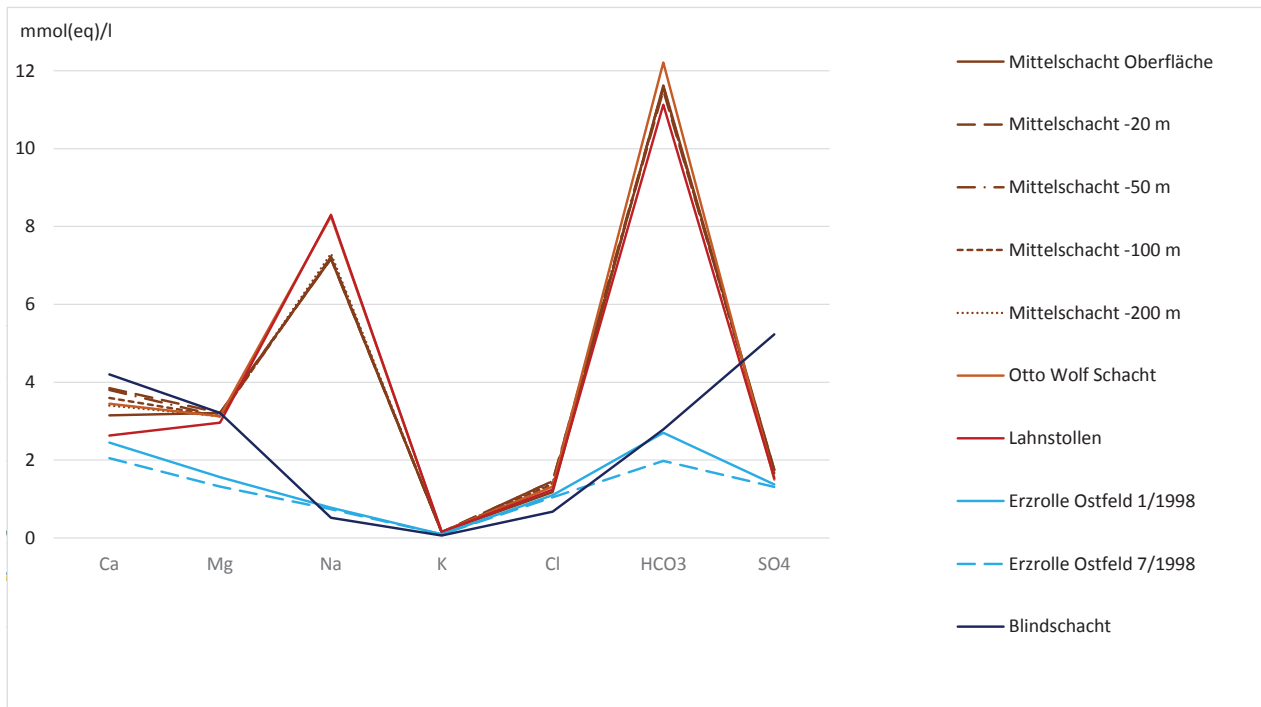


Abb. 22.2: Schoeller-Diagramm der Grubenwässer der gesättigten Zone der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter (Untersuchungen 1999).

6. Hydrogeologisches Modell der Grube Holzappel

Das Untersuchungsgebiet liegt auf der Hochfläche des Westerwaldes bei Holzappel. Der durchschnittliche jährliche Niederschlag beträgt dort ca. 850 mm. Im Bereich der unterdevonischen Sedimentgesteine ist erfahrungsgemäß von einer Grundwasserneubildung von 80 bzw. 120 mm (ohne bzw. incl. Interflow) auszugehen. Die Fläche des „kleinräumigen“ oberirdischen Einzugsgebietes wurde mit 4,7 km² bestimmt (Abb. 15).

Die Höhe des Grundwasserstandes wird durch die hydraulisch relevanten Vorfluter bestimmt. Durch das Einschneiden der Gewässer in das Rheinische Schiefergebirge verlagerten sich die Flüsse auf tiefe topografische Niveaus, da das Grundwasser der Gebirge in die Vorfluter entwässert, kam es auch zum Absinken der Grundwasserspiegel. Er erhöht sich uhrglasförmig unter Hochflächen und weist ein Gefälle zu den Gewässern auf. Hydraulisch relevante Gewässer sind der Gelbach und die Lahn. Kleinere Gewässer wie der Waselbach bei Holzappel liegen oberhalb des devonischen Grundwassers und werden überwiegend durch Schichtenwasser (Interflow) gespeist.

Bei ungestörten hydrogeologischen Verhältnissen ist für die Hochfläche um Holzappel davon auszugehen, dass das in den unterdevonischen Schichten zirkulierende Grundwasser großräumig nach Süden zur Lahn hin entwässert. Hydraulisch relevant ist jedoch auch der Gelbach der von Norden kommend in Richtung Süden zur Lahn hin fließt. Das devonische Grundwasser ist auch an den Gelbach angeschlossen. Dies bedeutet, dass Flächen im hydraulischen Einzugsbereich östlich und westlich des Flusses nicht direkt zur Lahn entwässern, sondern über das Gelbachsystem.

Der abgebaute NE-SW-streichende Holzappeler Gang wurde bis in Teufen von ca. 1.100 m unter Gelände auf einer streichenden Länge von etwa 4 km abgebaut. Dies führte zu einer (deutlichen) Änderung der hydraulischen Verhältnisse. Das geflutete Bergwerk mit seinen Schächten, Stollen und abgebauten Gangbereichen stellt eine hoch permeable Zone dar. Hingegen weisen die devonischen Sedimentgesteine überwiegend nur eine geringe Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit auf. Vereinfacht kann das geflutete Bergwerk hydraulisch mit einer Tiefdrainage verglichen werden. Durch das Anschneiden von Tiefenpotentiallinien und gleichzeitiger Druckentlastung infolge des resultierenden Absenkungstrichters kommt es – neben der Fassung oberflächennaher Grundwässer – auch zum Aufstieg von in größeren Tiefen zirkulierenden Grundwässern. Dabei wird der Grundwasserspiegel im Bergwerk auf das Niveau des Erbstollens (hier: Lahnstollen) abgesenkt. Der Lahnstollen verläuft aus dem Bergwerk bzw. den Abbaubereichen von Norden nach Süden in Richtung Lahn (Abb. 16). Im Bereich des Erzganges biegt er einige hundert Meter im Streichen der Abbaue ab, um das Grundwasser flächig zu erfassen.

Zur Abschätzung der Reichweite des Absenkungstrichters kann die durch Feldversuche des Corps of Engineers der U.S. Army modifizierte Formel von SICHARD (1928) herangezogen werden. Der Faktor wurde mit 1.750 als Mittelwert der Spannweite von 1.500 bis 2.000 angenommen:

$$R(m) = 1.750 * \text{Absenkung (m)} * \sqrt{kf(m/s)}$$

Die Formel gilt für homogene Grundwasserleiter. Vorliegend haben wir es jedoch mit einem anisotropen Kluftgrundwasserleiter zu tun. Sie kann damit allenfalls als Hinweis für die Größenordnung angenommen werden. Als Mittelwerte für die (Gebirgs-) Durchlässigkeit wurde eine Spanne von 5×10^{-7} m/s bis 5×10^{-9} m/s angenommen. Am Beispiel eines Absenkungsbetrages von 200 m, wie er im bearbeiteten Fallbeispiel unter der vereinfachten Annahme der Grundwasserstandes nahe der Geländeoberkante, kann die Reichweite des Absenkungstrichters wie folgt abgeschätzt werden (Abb. 23):

Beispiel:	Absenkung (m)	Mittlere Gebirgsdurchlässigkeit	Reichweite (m)
1.	200 m	$5 * 10^{-7}$ m/s	247 m
2.	200 m	$5 * 10^{-8}$ m/s	78 m
3.	200 m	$5 * 10^{-9}$ m/s	25 m

WENZEL (2015) hat an drei Grundwasseraufschlüssen Stichtagsmessungen des Wasserstandes durchgeführt:

Datum der Stichtagsmessung	06.06.2015	02.07.2015	23.08.2015
Rolle Ostfeld	+/- 0,00 m	+0,03 m	-0,09 m
Mittelschacht	+/- 0,00 m	+0,01 m	-0,22 m
Blindschacht	+/- 0,00 m	+0,41 m	-0,06 m

Die Höhendifferenzen sind auf die Stichtagsmessung am 06.06.2015 bezogen und geben die relativen Änderungen zu diesem Stichtag an. Positive Werte entsprechen höheren Grundwasserständen (Anstieg), während negative Angaben sinkende Grundwasserstände darstellen. Die Ergebnisse der drei Stichtagsmessungen zeigen, dass die Wasserstände nicht einheitliche Änderungen aufweisen. Dies ist ein deutlicher Hinweis, dass eine vollständige hydraulische Anbindung über Tiefbausohlen, Schächte oder Rollen nicht vorhanden ist. Es bestehen hydraulische

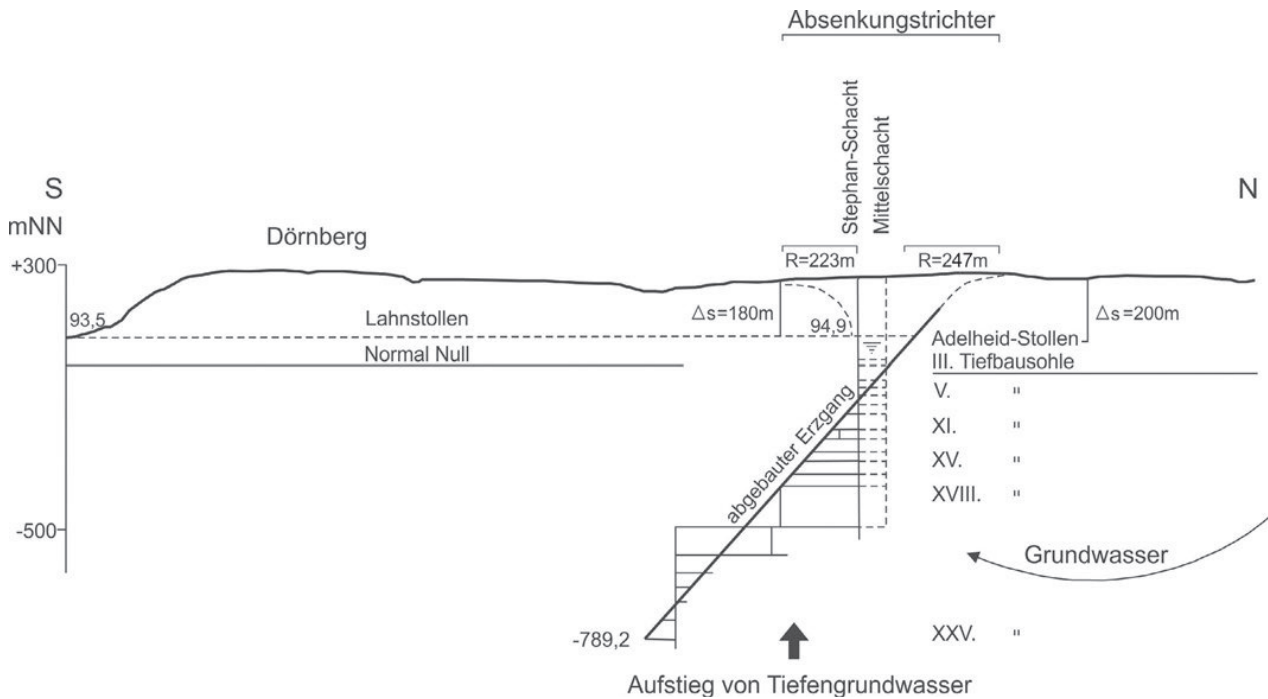


Abb. 23: Hydraulisches Modell der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter (Annahme: mittlere Gebirgsdurchlässigkeit 5×10^{-7} m/s).

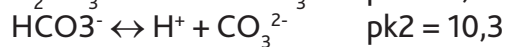
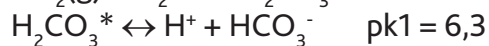
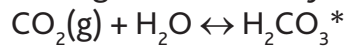
Barrieren, die in Zeiten höherer Grundwasserneubildung bzw. Einleitungen zu lokal steigenden Grundwasserständen führen (z.B. Blindschacht), die dann in Folge der daraus resultierenden höheren hydraulischen Gradienten wieder abgebaut werden. Mögliche Barrieren stellen die geologische Störung zwischen Haupt und Ostfeld sowie nicht vollständige Anbindung an die Tiefschächte (z.B. Verbrüche, isolierte Abbaubereiche etc.) dar.

Bei Schüttungsmessungen wurde für das hydrologische Winterhalbjahr 2014/15 ein Abfluss von ca. 15 l/s sowie in den Sommerhalbjahren 2014 und 2015 von rund 10 l/s am Auslauf des Lahnstollens festgestellt. Dies entspricht einem jährlichen Abfluss von etwa 400.000 m³. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass in der Hydrologie üblicherweise Zeiträume von 30 Jahren für Prognosen zugrunde gelegt werden. Unter der Annahme des Mittelwertes der Grundwasserneubildung von 100 mm/a lässt sich für ein Einzugsgebiet von 4,7 km² eine mittlere Grundwasserneubildung von 14,7 l/s abschätzen.

Damit besteht eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung zwischen dem Einzugsgebiet und der beobachteten Schüttung. Zu beachten ist jedoch, dass ein hydraulisches Gefälle vom Grubenwasserspiegel zur Lahn besteht, so dass – neben der Entwässerung über den Lahnstollen – von einem weiteren zusätzlichen Grubenwasserabstrom über das devonische Gebirge in Richtung Süden auszugehen ist.

Unabhängig davon ist es notwendig, die Unterschiede in der physiko-chemischen Beschaffenheit zwischen den Sickerwässern (ungesättigte Zone), den Grundwässern, die im Bergwerk selbst gebildet werden sowie den über den Lahnstollen abfließenden Grundwässern zu betrachten. Dies insbesondere, da auf tieferen Tiefbausohlen der Zutritt stark gasender Sauerlinge beschrieben wird. Hierzu werden die hydrochemischen Analyseergebnisse herangezogen:

Die Sickerwässer aus dem Bergwerksbereich unterscheiden sich vor allem durch eine geringere Mineralisation, einhergehend mit geringeren Natrium- und Hydrogencarbonatgehalten. Anteilig sind jedoch Sulfat und Nitrat erhöht. Die Sickerwässer werden beim Eintritt in den grundwassererfüllten Bereich vom aeroben in einen mit der Teufe zunehmend anaeroben Bereich verlagert. Dies geht u.a. einher mit einer Reduzierung von Nitrat über Nitrit zu Ammonium. Die fehlenden Nitratnachweise in den auslaufenden Wässern des Lahnstollens sind also kein sicheres Indiz für eine andere Herkunft (z.B. zutretendes Tiefengrundwasser). HERBST (1969) beschreibt den Zutritt eines stark gasenden Säuerlings auf den Tiefbausohlen, ohne den Ort näher zu beschreiben. Aktuell ist eine deutliche CO_2 -Entgasung an einer Blasenbildung an der Grundwasseroberfläche des Otto-Wolf-Schachtes makroskopisch zu erkennen. Starker CO_2 -Zutritt in Wasser führt zur Bildung von Kohlensäure, wobei nur ein geringer Teil zu H_2CO_3 umgesetzt wird. Unter Protonenabgabe entsteht Hydrogencarbonat. Diese Reaktion ist vor allem pH-Wert-abhängig.



Die hohen Hydrogencarbonatgehalte in den Grubenwässern der drei Tiefschächte sowie im Schrägschacht der Grube Peter und Lahnstollen sind auf die CO_2 -Zutritte auf den Tiefbausohlen der Grube zurückzuführen und führen zwangsläufig zur Aufsalzung geringer mineralisierter Wässer.

WIEBER (1999) hat Wasserproben mittels Rühner-Schöpfer teufendifferenziert aus dem Mittelschacht entnommen. Die Entnahmetiefen betragen – bezogen auf die Wasseroberfläche – wenige dm, 20 m, 50 m, 100 m sowie 200 m. Die physiko-chemischen Untersuchungsergebnisse wiesen dabei nur geringe Unterschiede auf. Ergänzend wurden im Otto-Wolf-Schacht mittels einer Sonde der Firma Sun & Sea kontinuierliche Messungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit von der Wasseroberfläche bis in 350 m Tiefe durchgeführt (Abb. 24).

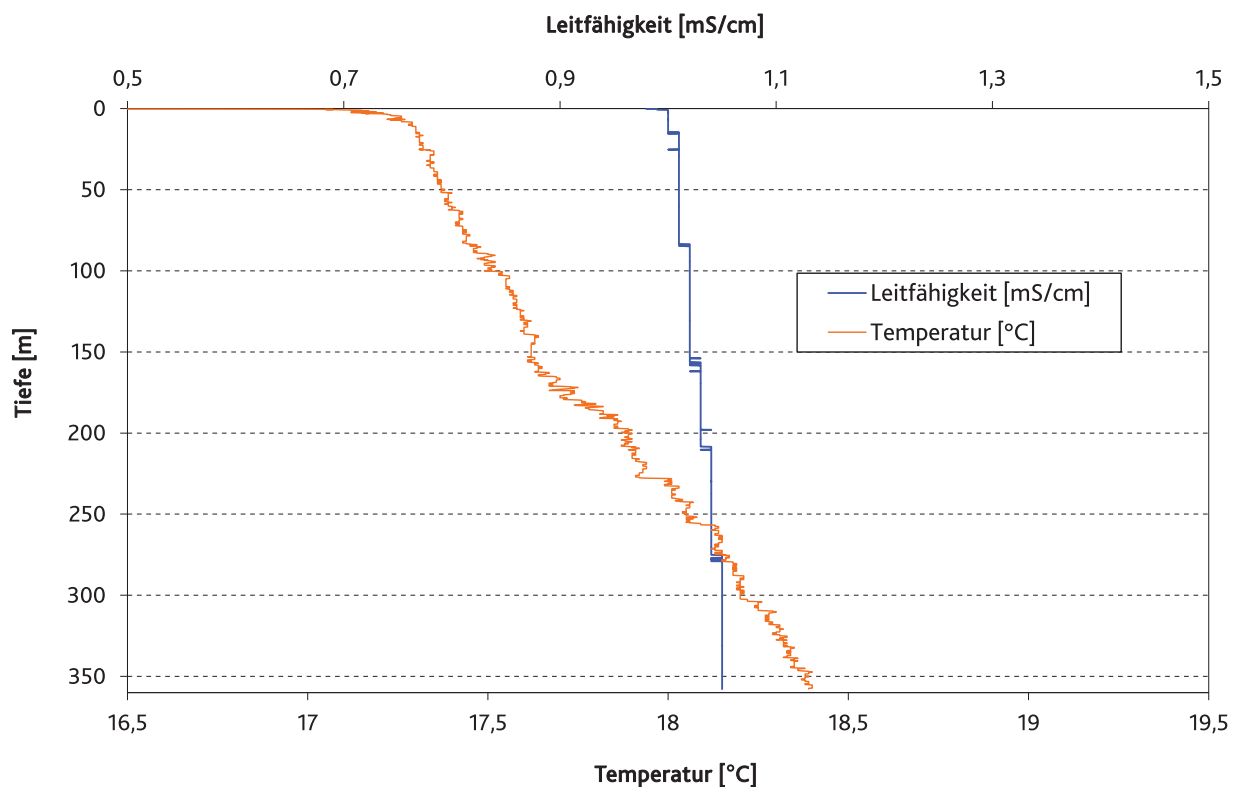


Abb. 24: Temperatur- und Leitfähigkeitsprofil im Otto-Wolf-Schacht, Grube Leopoldine Louise.

Das gesamte Profil weist nur geringe Änderungen der bestimmten Parameter auf. Die Temperatur beträgt an der Grundwasseroberfläche ca. 17 °C und nimmt kontinuierlich auf 18,4 °C zu (Abb. 24). Die Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit nehmen von 0,96 mS/cm (entsprechend 960 µS/cm) auf 1,05 mS/cm (entsprechend 1050 µS/cm) mit zunehmender Teufe zu (Abb. 24). Die Messwerte sind auf die Temperatur bei der Probenahme bezogen und nicht auf 25 °C umgerechnet.

Der Otto-Wolf-Schacht besitzt oberhalb der 5. Tiefbausohle keine Verbindungen zu gefluteten Tiefbausohlen. Er stellt damit einen Schacht ohne größere Wasserzu- und abflüsse über geflutete Tiefbausohlen in den oberen ca. 110 m Wassersäule dar. Es besteht jedoch ein deutlich erkennbarer Gaslift. Außerdem können sich auf Teufenintervalle beschränkte Konvektionskreisläufe ausbilden, die zu einer Schichtung der Wasserkörper innerhalb der Bergwerksschächte führen können (WOLKERSDORFER 2006; MELCHERS et al. 2014; WIEBER et al. 2016). Dabei bilden sich scharf begrenzte Sprung-/Trennschichten zwischen den einzelnen Konvektionkreisläufen aus (WIEBER et al. 2016 a und 2016b). Wärmere Wässer steigen dabei in den Schächten auf, kühlen an den Schachtwänden ab und sinken – gemäß der Theorie - in der Schachtmitte ab (GEBHARDT et al. 1988; NUTTALL et al. 2004; WOLKERSDORFER 1996 und 2006; WIEBER 1999; WIEBER et al., 2016). Beim Absinken nimmt die Temperatur wieder zu und es kommt zum erneuten Aufstieg (Kreislauf). Neben diesem Phänomen der freien Konvektion können sich aber auch Konvektionskreisläufe unter Einbindung von Tiefbausohlen und weiteren Schächten ausbilden (WOLKERSDORFER 1996; WIEBER 1999). Weitere Anschlüsse und direkte Verbindungen bestehen im Otto-Wolf-Schacht zur 11. und 18. Tiefbausohle (Abb. 25). In den untersuchten Schächten konnte keine Schichtung nachgewiesen werden.

Zusammenfassend lassen sich folgende hydraulischen Randbedingungen annehmen:

- Der Bergbau mit seinen Schächten und Tiefbausohlen sowie Abbaubereichen hat die natürlichen hydrogeologisch-hydraulischen Verhältnisse erheblich verändert und den Einstau erheblicher Wasservolumen ermöglicht.
- In den gefluteten Grubenbauen haben sich hydraulische Systeme mit lokal begrenzten sehr hohen Durchlässigkeiten (Stollen, Schächte, Abbaubereiche) innerhalb der devonischen Sedimentgesteine, die überwiegend durch geringe Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeiten charakterisiert sind, ausgebildet.
- In den Grubenbauen ist der Grundwasserspiegel gegenüber der ursprünglichen natürlichen Situation im unverritzten Gebirge (erheblich) abgesenkt. Das Bergwerk entspricht hydraulisch vereinfacht einer überdimensionalen Tiefendränage.
- Der gesättigten Zone sickern Wässer unterschiedlicher physiko-chemischer Beschaffenheit zu (Sulfatwässer durch Oxidation der primär sulfidischen Erze sowie Lösung der Verwitterungsbildungen, gering mineralisierte hydrogencarbonatische Sicker- und eingeleitete Oberflächenwässer, z.T. findet Carbonatfällung infolge CO₂ Entgasung statt, hohe Nitratgehalte etc.).
- Zum Teil finden punktuelle Sicker- oder Röschenwassereinträge mit hohen Schüttungen in die gesättigte Zone über z. B. Erzrollen statt, was in Zeiten hoher Grundwasserneubildung zum Anstieg des Grundwasserstandes in den gefluteten Grubenbauen führt. Dabei zeigen sich Höhenunterschiede bei den einzelnen Messpunkten in den Erzrollen und dem Blindschacht, was als Indiz auf einen verzögerten Abfluss in das System der entwässernden Tief-schächte/Tiefbausohlen – Lahnstollen zu deuten ist.

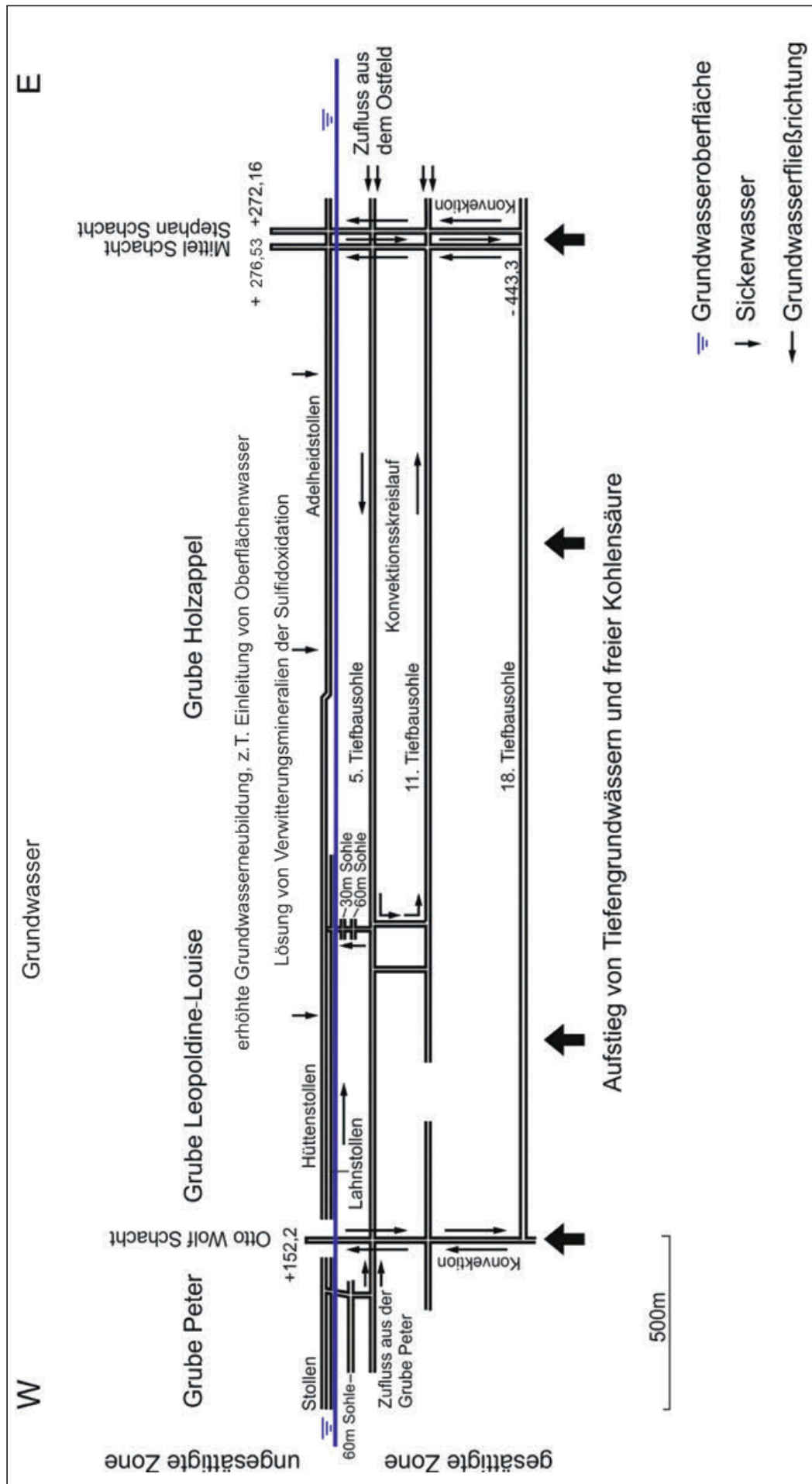


Abb. 25: Hydrogeologisches Modell der Verbundgrube Holzappel – Leopoldine-Louise – Peter.

- In den Tiefschächten, dem Schrägschacht der Grube Peter sowie dem Lahnstollen zirkulieren Grubenwässer mit sehr ähnlichen physiko-chemischen Eigenschaften infolge von Kohlensäurezutritten auf Tiefbausohlen, Konvektion, anaeroben Verhältnissen, Ionenaustausch etc..
- Die in den Tiefschächten zirkulierenden Grubenwässer unterscheiden sich deutlich in den physiko-chemischen Eigenschaften von den anderen Grubenwässern der gesättigten und ungesättigten Zone.
- Die aufgeschlossenen Grubenwässer in Erzrollen und Blindschächten sind maßgeblich durch Wässer der ungesättigten Zone (z.B. Nitratgehalte) sowie Lösung von Sekundärmineralien (z.B. erhöhte Sulfatgehalte) geprägt.
- Die gesättigte Zone entwässert überwiegend über den Lahnstollen in die Lahn.
- Nach Zeitzeugenaussagen soll sich der Grundwasserstand in der Vergangenheit temporär durch Einleitung von Oberflächenwässern (z.B. Hochwasserentlastung des Waselbachs) bis in den Adelheidstollen eingestaut haben. Dies führte auch zu Veränderungen der hydrochemischen Beschaffenheit der in den Tiefschächten und dem Lahnstollen zirkulierenden Grubenwässer (WIEBER, 1999).

7. Wärmefluss und geothermisches Potential

In der Erdkruste nimmt die Temperatur mit zunehmender Tiefe um ca. 3 °C/100 m zu. Das bedeutet, dass in 1.000 m Teufe anstelle der allgemeinen Temperatur oberflächennaher Grundwässer von ca. 10 °C eine Temperatur von ca. 40 °C vorherrscht. Nach Flutung des Bergwerks stieg der Grundwasserspiegel bis auf das Niveau des sogenannten Wasserlösungsstollens an. Vorliegend ist es der Lahnstollen, der zwischen Laurenburg und dem Gelbachtal in die Lahn entwässert (Abb. 1). Das eingestaute Grund- bzw. Grubenwasser (der gesättigten Zone) stellt ein „Mischwasser“ aus Grundwasserneubildung und Grundwasserzuflüssen in unterschiedlichen Tiefen dar.

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 (KALTSCHMIDT 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 (KALTSCHMIDT et al. 1999; CLAUSER 2009) und ergibt sich aus der Gleichung:

$$q_{\text{kond}} = \lambda * \Delta T / \Delta z$$

mit:

q_{kond}	konduktiver Anteil des Wärmestroms [W/m ²]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
ΔT	Temperaturgradient [K]
Δz	Schichtmächtigkeit [m]

Tab. 6: Wärmeleitfähigkeiten von Wasser, Luft, Sandstein, Tonstein. * nach BAEHR & STEPHAN (2006); ** nach Verein Deutscher Ingenieure (VDI, 2000).

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

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine spezifische Materialeigenschaft. Für ausgewählte Stoffe ist sie in Tabelle 6 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.

In gefluteten Bergwerken des Rheinischen Schiefergebirges sind die vorhandenen Temperaturen 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 Laurenburg bietet ideale Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung, da die Temperatur (nach den bisherigen Messungen) mit kontinuierlich $>18,3$ °C hoch und die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und potentiellen Verbrauchern gering ist. So wird eine effektive Ausbeute ermöglicht. Es 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 der 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 bis 0,3 m³/h für 1 kW Verdampferleistung bei einer Temperaturdifferenz von 3K. Dies entspricht einer Wassermenge von 0,228 l/s bei einer Temperaturdifferenz von 1K. Die extrahierbare Wärme/Verdampferleistung ($W_{\text{thermisch}}$) lässt sich für das auslaufende Grubenwasser bei der Wärmekapazität von Wasser (4200 J/l/K) für eine frei auslaufende Wassermenge (Q) und einer Temperaturabsenkung berechnen:

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

Unter konservativen Annahmen wurde das geothermische Potential der frei ablaufenden Grubenwässer berechnet (Tab. 7).

Tab. 7: Geothermisches Potential der frei abfließenden Grubenwässer der Grube Holzappel .

	Wassermenge (Q)	Temperatur (°C)	Temperatur- absenkung (ΔT)	geothermisches Potential
Lahnstollen	10 l/s	19°C	10°C	400 kW
	15 l/s	19°C	10°C	600 kW
Herminenstollen	1 l/s	10°C	5°C	20 kW
	2 l/s	10°C	5°C	40kW

Das geothermische Potential der aus dem **Lahnstollen** auslaufenden Wässer beträgt unter den genannten Randbedingungen rund 400 bis 600 kW. Diese geothermische Energie entspricht dem Wärmebedarf von ca. 40 bis 60 modernen Einfamilienhäusern. Die geothermische Energie tritt in freiem Gefälle aus dem Bergwerk aus. Für den Betrieb der Wärmepumpe wird elektrische Energie (etwa ein Fünftel der Energieausbeute) benötigt. Bei Nutzung der auslaufenden Wässer kommt es zu keinen Änderungen im System „Bergwerk“.

Für den **Herminenstollen** (Annahme: Schüttung 1 bzw. 2 l/s, Temperatur 10°C) lässt sich die Geowärme bei 5°C Abkühlung mit ca. 20 bzw. 40 kW berechnen.

In den Gesteinen des Bergwerks ist – gegenüber dem auslaufenden Grubenwasser - 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.

8. Technische Umsetzungsmöglichkeiten

Die Nutzung gefluteter Grubenbaue ist einerseits als Wärmequelle für Wärmepumpenanlagen und andererseits als Wärmespeicher möglich (SCHABERG 1998). Der Wärmeentzug kann im Entwässerungsstollen oder in den Grubenbauen (z.B. Schächte) erfolgen. Dabei kann die thermische Nutzung mittels untertägiger Wärmetauscher oder über Tage nach Förderung der Grubenwässer erfolgen (Abb. 26). Hinsichtlich der Wiedereinleitung der geförderten Grubenwässer sowie der technischen Umsetzung der untertägigen thermischen Nutzung lassen sich unterschiedliche Varianten unterscheiden.

Es kommen zwei generelle Möglichkeiten der geothermischen Nutzung in Betracht:

1. Nutzung der Grubenwässer in den Grubenbauen (Sättigungszone)
2. Nutzung von Grubenwässern im Entwässerungsstollen
 - a. Herminenstollen,
 - b. Nutzung der Grubenwässer der gesättigten Zone (Entwässerung derzeit über Lahnstollen).

Variante 1: Bei der Nutzung der Geowärme über Wärmetauscher in den Grubenbauen wären diese in die Schächte (Mittel- oder Stephanschacht) einzubringen. Der Aufwand der technischen Umsetzung ist sehr hoch.

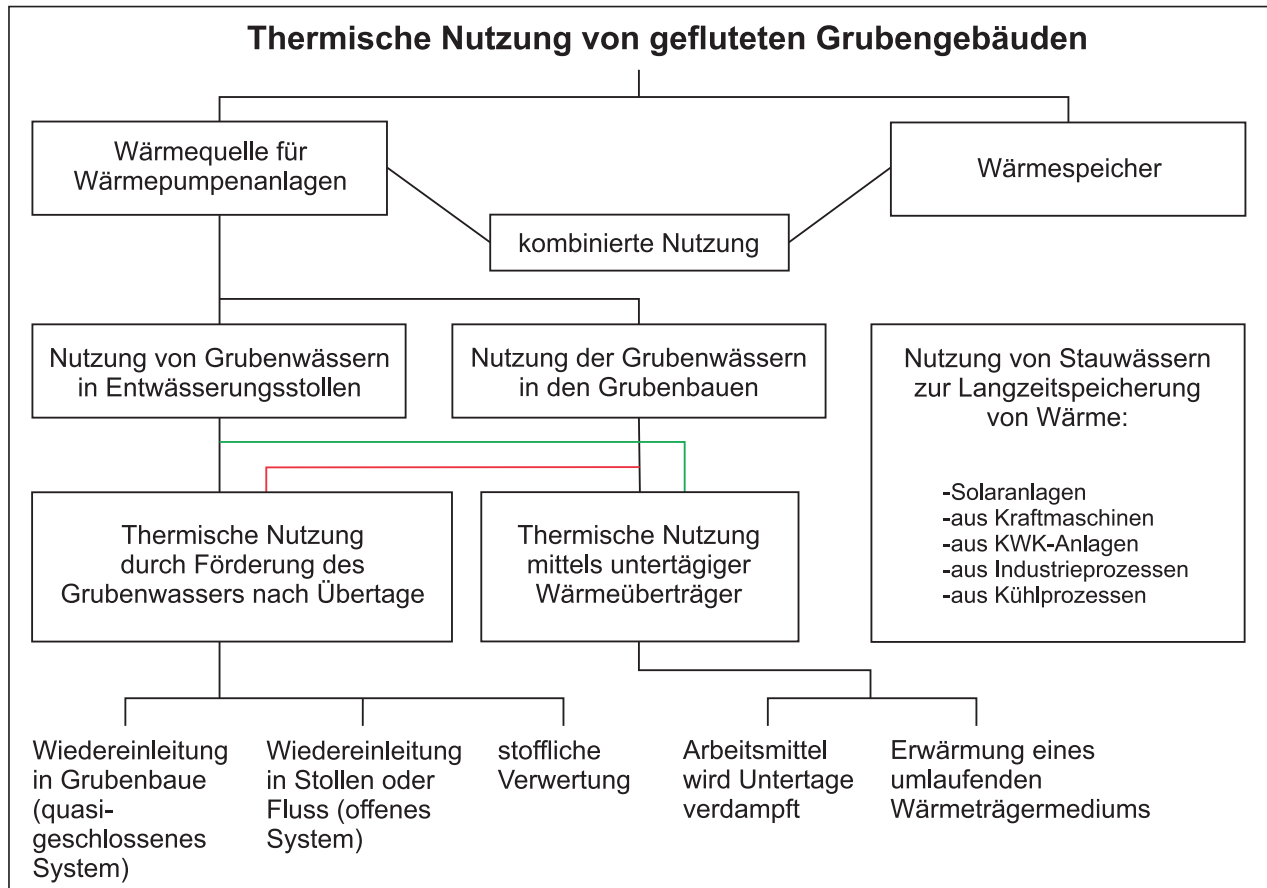


Abb. 26: Möglichkeiten der geothermischen Nutzung gefluteter Grubenbaue (nachgez. SCHABERG 1998).

Bei der **Variante 2** käme die Nutzung der Wässer der ungesättigten Zone (Herminenstollen) [Variante 2a] sowie der gesättigten Zone [Variante 2b], die derzeit über den Lahnstollen abgeleitet werden in Betracht.

Variante 2a: Der Herminenstollen führt Wasser der ungesättigten Zone ab. Die Schüttung ist gering und von der jahreszeitlichen Niederschlagsintensität abhängig. Allerdings ist der Stollen gut zugänglich und die Wärmetauscher könnten in unmittelbarer Nähe der Verbraucher in den Stollen eingebaut werden. Energetische Optimierungen sind durch weiteren Wassereinstau (z.B. durch Verschluss des Stollens durch z.B. eine Staumauer oder Fassung weiterer Wässer) möglich.

Variante 2b: Der Lahnstollen führt das „warme“ Grundwasser in die Lahn ab. Bei den Stichtagsmessungen wurden durch den Bearbeiter Schüttungen von 10 bis 16 l/s und Temperaturen zwischen 18,3 und 20,7°C bestimmt. Das geothermische Potential dieses Grubenwassers der gesättigten Zone ist sehr hoch (bei einer Wassermenge von 10 l/s und Abkühlung um 10°C entspricht es 400 kW) und wäre somit auch geeignet, die Grundlast des gesamten Heilerziehungs- und Pflegeheims in Laurenburg zu bedienen. Allerdings beträgt die Entfernung vom Auslauf des Lahnstollens bis nach Laurenburg ca. 2,5 km Luftlinie.

Denkbar wäre aber ein wasserdruckhaltender Verschluss des Lahnstollens. Dies führt zu einem Anstieg des Grundwassers bis auf das Niveau des Adelheidstollens und Auslauf des Grubenwassers über den Herminenstollen. Der Hüttenstollen (westlicher „Tiefer Stollen“ der Grube Leopoldine Louise) liegt topographisch höher.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Pumpe in einen der Tiefschächte (Mittel- oder Stephanschacht) einzubringen und das für die geothermische Nutzung benötigte Grubenwasser zu heben (Abpumpen) und über den Adelheid- und Herminenstollen abzuleiten.

Schriften

- BAEHR, H.D. & STEPHAN, K. (2006): Wärme- und Stoffübertragung: 757 S., 332 Abb., 5. neu bearb. Aufl.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- CLAUSER, C. (2009): Heat Transport Processes in the Earth's Crust. – *Surveys in Geophysics*, **30**: 163-191; Dordrecht.
- EINECKE, G. (1932): Der Bergbau und Hüttenbetrieb im Lahn- und Dillgebiet und in Oberhessen: 777 S., 103 Fig., 182 Taf.; Wetzlar (Berg- und Hüttenmännischer Verein).
- HERBST, F. (1969): Über die im Raum Holzappel – Nassau aufsetzenden Blei-Zink-Erzgänge: 60 S.; Bad Ems (Gewerkschaft Mercur).
- KALTSCHMITT, M. & HUENGES, E. & WOLFF, H. (Hrsg.) (1999): Energie aus Erdwärme – Geologie, Technik und Energiewirtschaft: 265 S., 77. Abb., 45 Tab.; (Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- MELCHERS, C., WESCHE, D. & COLDEWEY, W. (2014): Ausbildung von Dichteschichtungen in Schächten des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet. – In: 14. Altbergbau – Kolloquium: 156-162, 2 Abb., 1 Tab.; Nossen (Wagner).
- NUTTALL, C.A. & YOUNGER, P. (2004): Hydrochemical stratification in flooded underground mines: an overlooked pitfall. – *J. Contam. Hydrol.*, March 2004, **69**(1-2): 101-114.
- REQUADT, H. (1990): Erl. Geol. Karte Rheinland-Pfalz 1 : 25.000 Blatt Schaumburg. – 212 S., 53 Abb., 17 Tab., 1 Beil.; Mainz.
- SCHABERG, A. (1998): Nutzung von Grubenräumen zur Wärmespeicherung. – Diss. TU Bergakademie Freiberg: 155 S.; Freiberg.
- SCHEID, R. (1986): 200 Jahre Erzbergbau auf der Grube Holzappel. – *Bad Emser Hefte*, **51**, 27 S.; Bad Ems.
- (1995): 200 Jahre Erzbergbau in der Esterau – die Grube Holzappel: 68 S.; Holzappel.
- SCHÖPPE, W. (1911): Der Holzappeler Gangzug. – *Arch. Lagerst.-Forsch.*, **3**: 96 S., 10 Abb., 7 Tab.; Berlin.
- SLOTTA, R. (1983): Der Metallerzbergbau. – *Technische Denkmäler in der Bundesrepublik Deutschland*, **4**, Teil II: 855-1227; Bochum.
- SICHARDT, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen: 89 S., 40 Abb., 19 Tab.; Berlin (Springer).
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2000): VDI-Richtlinien 4640, Blatt 1 Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. – VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), 32 S.; Düsseldorf.
- VIEHMANN, C. (2007): Hydrogeologie im Gebiet von Bad Ems/Lahn und Möglichkeiten zur Nutzung des geothermischen Potentials. – *Dipl.-Arb.*, Univ. Koblenz-Landau, 138 S., 23 Abb., 23 Tab.; Koblenz – (unveröff.).
- WENKENBACH, (1865): Beschreibung der im Herzogthum Nassau an der unteren Lahn und dem Rhein aufsetzenden Erzgänge. – *Nass. naturwiss. Jahrb.* **XVI**: 266 – 303, 3 Taf.; Nassau.
- WENZEL, M. (2015): Zur Geologie und Hydrogeologie der Grube Holzappel, Westerwald, Untere Lahn. – *Dipl.-Arb.* Univ. Mainz, 70 S., Anh., 43 Abb., 9 Tab.; Mainz – (unveröff.).

- WIEBER, G. (1999) Die Grubenwässer des ehemaligen Blei-, Zink-, Kupfer- und Quecksilber-Erzbergbaus an Beispielen des westlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Saar-Nahe-Senke: Hydraulik, hydrochemische Beschaffenheit und umweltgeologische Bewertung. – Habil.-Schr. Univ. Gießen, 250 S., 69 Abb., 57 Tab.; Gießen.
- (2015): Geothermisches Potential der Grube Holzappel (Stand 05.12.2015). – 39 S., 25 Abb., 12 Tab.; Koblenz. – (Gutachten, unveröff.).
 - (2016): Einführung in die Standsicherheitsproblematik historischer Bergbauhalden am Fallbeispiel des Unteren Lahn Reviers. – In: Forschungsstelle Rutschungen (Hrsg.): 16. Weiterbildungsseminar 16: 32 – 35, 5 Abb., 1 Tab.; Mainz.
- WIEBER, G., ENZMANN, F. & KERSTEN, M. (2016 a): Entwicklung und Veränderung der Dichteschichtung in Schächten gefluteter Erzbergwerke. – In: Mainzer geowiss. Mitt., 44: 205-226, 9 Abb., 4 Tab.; Mainz.
- (2016 b): Pycnocline dynamics in an abandoned and flooded mine. – In: DREBENSTEDT, C. & PAUL, M.: IMWA 2016 – Mining Meets Water – Conflicts and Solutions: 637 – 641; Freiberg (TU Bergakademie Freiberg).
- WIEBER, G. & POHL, S. (2008): Mine Water: A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif. – In: RAPANTOVA, N. & HRKAL, Z.: Mine Water and the Environment: 113-116; Ostrava (VSB – Technical University of Ostrava).
- WILD, H. W. & BÜHLER, H. G. (1993): Das mittelalterliche Kupferbergwerk Fischbach (Nahe): Geologie, Geschichte, Gewinnung und Verhüttung der Kupfererze: 32 S., 21 Abb.; Fischbach/Nahe.
- WOLKERSDORFER, Ch. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks - Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. – Clausthaler geowiss. Diss., 50: 1-216, 131 Abb., 61 Tab.; Clausthal.
- (2006): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. – Habil.-Schr. TU Bergakademie Freiberg, 465 p., 136 fig., 34 tab.; Berlin (Springer).

Manuskript eingegangen am 10.07.2017

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