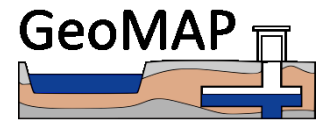




Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



2. Fachkonferenz des Projektes GeoMAP

„Geothermisches Potenzial von Grubenwässern und Herausforderungen der Anlagentechnik“

„Geotermický po-tenciál důlních vod a technologické výzvy“

Freiberg, 26. November 2019



technische
THERMO
DYNAMIK

Veranstalter

Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

TU Bergakademie Freiberg

Gustav-Zeuner-Straße 7

09599 Freiberg

Kontakt

Dr.-Ing. Thomas Grab

+49 3731 39-3004

Thomas.Grab@ttd.tu-freiberg.de



geothermie.iwtt.
tu-freiberg.de

Chemisches und thermisches Potential von Bergbauwasser

Prof. Dr. habil. Broder Merkel

TU Bergakademie Freiberg – merkel@geo.tu-freiberg.de

1. Grundlagen/Einführung

Bergbauwasser ist oberirdisches Wasser oder Grundwasser, das durch Bergbau in seiner Fließbewegung, seiner Chemie und/oder seiner Temperatur beeinflusst worden ist. Diese Beeinflussung kann sehr gering sein, sodass eine Unterscheidung von natürlichem Wasser kaum möglich ist. Andererseits kann aber die Beeinflussung auch massiv ausfallen und die Eigenschaften des Bergbauwassers hinsichtlich Fluidodynamik, Wasserchemie und Korrosionseigenschaften grundlegend ändern. Dies sind drei Punkte, die bei einer Nutzung von Bergbauwässern zu beachten sind.

Der Begriff „Potential“ im Titel dieses Beitrages versteht sich einerseits im Hinblick auf das wirtschaftliche Potential der Nachnutzung dieser Wässer nach einer aktiven Bergbauphase. Dieses wirtschaftliche Potential kann sich nur auf die nutzbare Wärmekapazität des Wassers beziehen oder aber zusätzlich auf ausgewählte Wasserinhaltsstoffe, die dem Bergbauwasser entzogen werden können oder seine Nutzung für andere Zwecke (Trinkwasser, Brauchwasser, Bewässerung etc.). Sowohl der Entzug von Wärme aber vor allem die Gewinnung bestimmter Inhaltsstoffe [1] oder die sonstige Nutzung erfolgt vor allem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Andererseits kann in bestimmten Fällen auch die Verhinderung einer Kontamination der Umwelt durch Wärme und im Wasser enthaltenen Inhaltsstoffen die Motivation für die Durchführung einer Maßnahme sein. Ebenso ist eine Kombination von unterschiedlichen Beweggründen denkbar. Zusätzlich ist die Frage des Korrosionspotentials von Bergbauwässern zu sehen, denn dieses kann dazu führen, dass Werkstoffe (insbesondere Metalle und Beton) durch das Bergbauwasser angegriffen werden. Umgekehrt kann es auch zu unerwünschten Ausfällungen aus Bergbauwasser zum Beispiel an Messgeräten, Rohrleitungen, Pumpen oder Wärmetauschern kommen. So gesehen kann der Begriff Potential auch in dem Sinne verstanden werden, welche potenziellen Schäden durch Bergbauwässer entstehen können.

Der Begriff Thermodynamik wird im Folgenden ausschließlich im Sinne der chemischen Thermodynamik verstanden, also der mathematischen Beschreibung chemischer Gleichgewichte als spezieller Zustand der chemischen Kinetik.

2. Hydraulische Veränderungen

Durch den Abbau von Bodenschätzen (und Abraum) durch Bergbau im Tagebau entstehen Defizite, die nach dem Wiederanstieg zu Tagebaurestseen werden und einen nachhaltigen Einfluss auf das Grundwasser haben. Der Grundwasserspiegel, der vor dem Tagebau eine quasi kontinuierliche Neigung in Fließrichtung zeigte, weist nach dem Tagebau einen stufen-artigen Verlauf auf, weil im Bereich der künstlichen Seen der Wasserspiegel kein Gefälle hat. Dieses hat zum Teil erhebliche Konsequenzen auf den Abstand des Grundwassers zur Geländeoberfläche.

Beim tiefen Bergbau wird weniger Abraum aus einem Bergwerk transportiert; dennoch entstehen hier Schächte und horizontale Auffahrungen (Strecken) sowie Bereiche der Auserzungen, die teilweise mit Versatz gefüllt wurden. Diese bergmännischen Tätigkeiten führen ebenso zu einer signifikanten Veränderung der Grundwasserströmung nach der Flutung eines Bergwerkes (Abb.1). Das hat wiederum Konsequenzen auf Hydraulik, Chemismus des Wassers und Wärmeaustausch. Durch die signifikante Erhöhung der Wegsamkeiten gibt es ähnlich wie im Bereich von Tagebauten Ver-

änderungen der Neigung der Grundwasseroberfläche und einen veränderten Wärmeaustausch mit dem Gestein durch einen erhöhten Wasserdurchfluss auf bevorzugten Fließbahnen (Abb. 1).

Das führt dazu, dass alte geflutete tiefe Bergbauegebiete aufgrund der hohen Durchströmungsraten potenzielle Gebiete für geothermische Wärmenutzung sind. Andererseits kühlt sich der Untergrund aber auch vergleichsweise schneller ab, wenn nur die durch den Bergbau entstandenen Hohlräume durchströmt werden. Dadurch kann die Nutzungszeit entsprechend verkürzt sein. Eine Erkundung und Modellierung gefluteter Bergwerke im Hinblick auf die Durchströmung und die Abkühlung des Gesteins in Abhängigkeit von den durchströmten Strecken des Netzwerkes (Grundwasserleiter mit doppelter Porosität) und der entzogenen Wärmemenge ist daher notwendig. Bei der numerischen Modellierung solcher Systeme muss berücksichtigt werden, dass die Strömung aufgrund unterschiedlicher Temperaturen und Salzgehalte des Bergbauwassers dichtegetrieben sein kann und daher ein geeigneter mathematische Ansatz verwendet werden muss.

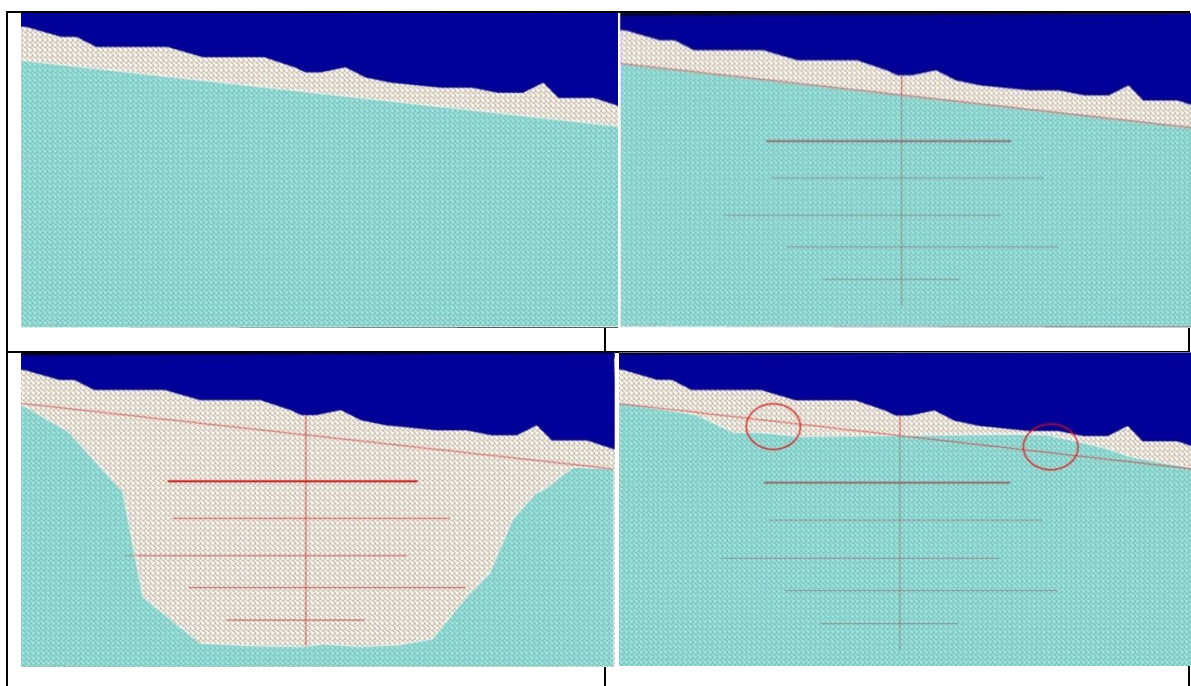
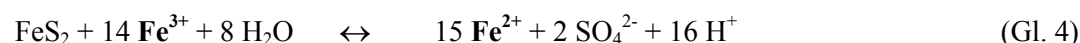
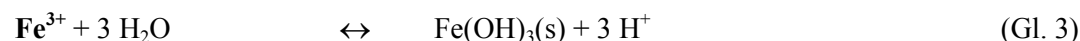
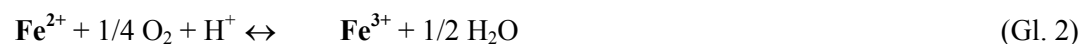
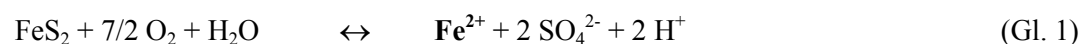


Abb. 1: Veränderungen im tiefen Bergbau. Geringes Gefälle im Bereich der gefluteten Grube durch hohe Fließgeschwindigkeiten und Fließen auf bevorzugten Wegen (oben links: Zustand vor Bergbau; unten rechts Zustand nach Flutung des Bergbauebietes). Eine Folge kann ein schnelles Abkühlen des Gesteins um die bevorzugten Fließbahnen sein. Der Aspekt dichtegetriebener Strömung ist in dieser Abbildung ebenso wenig wie doppelte Porosität berücksichtigt.

3. Chemische Charakterisierung des Bergbauwassers

In Die bekannteste und folgenreichste chemische Veränderung des Grundwassers weltweit in Bergbauebenen ist mit der Oxidation sulfidischen Mineralen (z. B. Pyrit) verbunden. Diese wird ausgelöst durch die Absenkung des Grundwassers und der damit verbundenen Zufuhr von atmosphärischer Luft in Bereiche, die vor dem Bergbau durch Grundwasser bedeckt waren oder zumindest von einem aktiven atmosphärischen Kontakt ausgeschlossen waren. Der in der Atmosphäre mit 21 Vol% enthaltene Sauerstoff triggert die Sulfid Oxidation (Gl. 1), die sich dann vereinfacht über drei weitere Reaktion (Gl.2 bis 4) fortsetzt.



Aus den Gl. 2 bis 4 ist unschwer zu erkennen, dass die weitere Oxidation von Sulfid durch Eisen in der Oxidationsstufe drei (Fe^{III}) erfolgt. Dies sind Reaktionen, die wie auch die Oxidation in Gl. 1 durch Mikroorganismen mehr oder weniger beschleunigt werden. Die direkte Folge der 4 Reaktionen sind niedrige pH Werte (auch negative pH Werte sind möglich [1]) und erhöhte Sulfat-Konzentrationen des Bergbauwassers. Eine weitere - oft visuell erkennbare Folge - sind rote Eisenhydroxid-Ausfällungen, die der geringen Wasserlöslichkeit von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ geschuldet sind. Nicht direkt sichtbar ist, dass saure Wässer sehr gut weitere Minerale lösen können. Die Folge sind somit oft erhöhte Metall-Konzentrationen (z.B. Mn, Pb, Cd, Ni, Zn, Cu, Al). Erhöhte Arsengehalte sind meist der Oxidation von Arsenopyrit (FeAsS) geschuldet.

Eine wichtige Konsequenz aus den niedrigen pH Werten von Bergbauwässern sowie deren oft besondere Zusammensetzung ist der Fakt, dass die klassisch definierte Alkalinität (Säureneutralisation-Kapazität der Kohlensäure) von Wasser über die Titration mit einer Säure auf pH 4,3 zu falschen Ergebnissen führt. Vielmehr ergibt sich das Neutralization Potential NP für Bergbauwässer aus Gl. 5 (ergänzt nach [2]):

$$\text{NP} = 2 (\text{CO}_3^{2-}) + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^- - \text{H}^+ - \text{HSO}_4^- - 2 \text{Mn}^{2+} - 2 \text{Fe}^{2+} - 2 \text{Cu}^{2+} - 3 \text{Al}^{3+} - \text{HUS}^1 \quad (\text{Gl. 5})$$

(alle Konzentrationen in mmol/L)

Als Konsequenz aus Gl. 5 kann die HCO_3^- -Konzentration in typischen Bergbauwässern nicht mittels Titration der Alkalinität bestimmt werden. Die beste und fast einzige Alternative ist die Bestimmung des TIC (Total Inorganic Carbon) mithilfe eines TIC/DOC Analysators. Dabei wird eine Wasserprobe zunächst auf einen pH-Wert < 2 angesäuert und der gesamte anorganische Kohlenstoff in gasförmiges $\text{CO}_{2(\text{g})}$ umgewandelt. Das CO_2 wird anschließend mittels eines Inertgases aus der Probe ausgetrieben und in einem NDIR² Detektor als TIC (C in mg/L) gemessen. Ist diese Messung erfolgt, wird die entgaste Wasserprobe entweder verbrannt oder mit einem starken Oxidationsmittel versetzt und somit der enthaltene organische Kohlenstoff ebenfalls in $\text{CO}_{2(\text{g})}$ umgewandelt und wie oben beschrieben in einer zweiten Messung der DOC bestimmt. Aus dem TIC und dem pH-Wert werden dann über das thermodynamische Gleichgewicht die $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ -Konzentrationen berechnet (Gl.5). Die anderen Wasserinhaltsstoffe in Gl. 5 müssen natürlich ebenfalls analytisch bestimmt werden.

Bergbauwässer müssen aber nicht zwingend sauer sein. Dies kann daran liegen, dass in dem betreffenden Gebiet entweder keine Sulfide als Minerale vorliegen oder aber es sich um tiefe Grundwässer handelt, die noch nicht mit atmosphärischem Sauerstoff in Berührung gekommen sind. Grundwässer und Bergbauwässer, die aus tiefen Grundwasserleitern stammen, sind an niedrigen (negativen) ORP³-Werten und geringen Sauerstoff-Konzentrationen erkennbar. Bei solchen Wässern besteht bei einer thermischen Nutzung die Gefahr, dass das Wasser im Zuge der Nutzung mit Sauerstoff in Kontakt kommt und es dann sehr schnell zu einer Ausfällung von Eisen und Mangan in Form von Eisen- und Mangan(hydro)oxiden kommt. Zu solchen Problemen kommt es auch, wenn Bergbauwässer nur teilweise oxidiert sind (kinetischer Effekt) oder es sich um Mischwässer handelt. Eine genaue Kenntnis der Wasserchemie einzelner Zuflüsse und der Grundwasserleiter im gesamten System unter räumlichen und zeitlichen Gesichtspunkten ist somit

¹ HUS steht für Huminstoffe

² Nicht-dispersiver Infra-Rot Detektor (meist mit zwei Wellenlängen, wodurch eine eindeutige Erkennung von CO_2 neben anderen Infra-Rot aktiven Gasen möglich ist.

³ ORP steht für Oxidation Reduction Potential und wird im Feld mit einer Elektrode ähnlich wie der pH-Elektrode gemessen. Dabei wird Platin normalerweise als Indikatorelektrode genutzt und Ag/AgCl als Referenzelektrode. Dieser Wert muss dann auf den eH-Wert bei 25°C umgerechnet werden (Potenzial bezogen auf SHE (Standard Hydrogen Elektrode)), um Werte verschiedener Redox-Elektroden und Wässer unterschiedlicher Temperaturen miteinander vergleichen zu können. Leider wird manchmal das Umrechnen vergessen oder es werden die Begriffe verwechselt.

unabdingbar, um Überraschungen im Betrieb einer Wärmenutzung von Bergbauwasser zu vermeiden.

4. Korrosion und Scalings

Korrosion von Werkstoffen im Kontakt mit Wasser ist ein Thema in Bezug auf Bauwerke und Maschinen, das im Zusammenhang mit der Nutzung von Bergbauwasser zu berücksichtigen ist. Dabei sind einerseits Metalle und andererseits Zement und Beton zu berücksichtigen. Ein sehr wichtiger Aspekt sind auch die Aspekte von zusätzlichen Parametern, die dazu führen, dass man in Abhängigkeit von den Werkstoffen zwischen Flächenkorrosion, Lochkorrosion und Spannungs- bzw. Schwingungsrissskorrosion unterscheiden muss.

Auch Kunststoffe sind keineswegs inert gegen Korrosion; so ist z. B. Acrylglas anfällig gegenüber Spannungsrissskorrosion, GfK-Laminat bezüglich Osmose [3] und PVC versprödet insbesondere unter UV-Strahlung. Nahezu alle Kunststoffe unterliegen zudem mikrobieller Korrosion. Eine eingehende Betrachtung der Korrosion und Alterung aller Kunststoffe würde den Umfang dieser Abhandlung sprengen.

Die Korrosion von Metallen ist extrem vom Metall und der Metalllegierung abhängig (Eisen, Stahl, Kupfer, Aluminium etc.). Für fast alle Metalle und Metalllegierungen gilt aber, dass die folgenden Parameter des Wassers im Kontakt mit dem Material einen Einfluss haben: pH, Temperatur, Gasgehalte (O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , NH_3 , SO_2 , H_2S und intermediäre Phasen zwischen SO_2 und H_2S), im Wasser gelöste Anionen (Cl , SO_4 , NO_3 , NO_2 , HCO_3) und auch Si sowie einige Spurenmetalle, organische Komponenten incl. Detergentien und Mikroorganismen (vor allem Bakterien und Algen). Generell gilt, dass mit höheren Werten (z.B. der Temperatur) und höheren Konzentrationen die Korrosion stärker gefördert wird; aber es gibt auch Abweichungen davon. Beim pH-Wert steigt das Korrosionsrisiko meist mit kleineren Werten, aber dies ist nur der pH-Skala geschuldet. Wichtig ist auch, dass bei der Bewertung nicht nur einzelne Parameter und deren Konzentration singular betrachtet werden; es muss vielmehr die Kombination von verschiedenen Parametern berücksichtigt werden (z. B. pH, Biofilme und die Konzentrationen von H_2S und Cl , sowie Spannungen im Werkstoff bzw. Inhomogenität im Werkstoff), da sich die jeweiligen Effekte nicht-linear beeinflussen können. Eine rein thermodynamische Betrachtung ist in vielen Fällen nicht sinnvoll. Dies erschwert die Evaluierung, weil für kinetische gesteuerte Prozesse oft keine ausreichenden Daten (Reaktionsraten) für kinetische Modelle zur Verfügung stehen und somit Versuche dann unabdingbar sind.

Normaler Beton enthält Zement ($3 CaO \cdot 2 SiO_2 \cdot 3 H_2O$) als Bindemittel und Gesteinspartikel einer bestimmten Kornzusammensetzung. Vielfach ist Beton auch ein Verbundwerkstoff durch Kombination mit einer zugfesten Bewehrung (z. B. aus Stahl oder auch Kunststoff-, Textil oder Glasfasern). Bei der Korrosion von Beton und Zement durch Bergbauwasser muss somit einerseits die Korrosion des Betons an sich aber andererseits auch die der Bewehrung betrachtet werden. Beton neigt zur Bildung von feinen Haarrissen, die sich durch „lösenden“ und „treibenden“ Angriff (Terminologie der Bauindustrie) mit der Zeit erweitern können und den Beton und die Bewehrung sukzessive schädigen können.

Für einen „lösenden“ Angriff sind vor allem Säuren verantwortlich während für den „treibenden“ Angriff neben der sprengenden Wirkung von gefrorenem Wasser (Frost) vor allem die Bildung von Gips bzw. Ettringit eine Rolle spielt. Für die Bildung von Gips ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$) und Ettringit ($3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$) [4] sind die Konzentrationen von Ca, SO_4 und Al im Wasser die entscheidenden Konzentrationen. Insbesondere der SO_4 -Gehalt ist in der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 das entscheidende Kriterium mit Expositionsgrenzwerten von 600 bzw. 1500 mg/L und erfordert die Verwendung speziellen Betonarten mit hoher Dichtigkeit. Bei SO_4 -Werten > 1500 mg/L wird eine Mischung von Zement und Flugasche verwendet. Ein typisches Bergbauwasser als Folge der Pyrit Verwitterung hat somit aufgrund des sauren pH-Wertes und der hohen SO_4 -Gehalte sowohl eine „lösendes“ als auch „treibendes“ Potential haben. Das Bergbauwasser selbst

hat zwar in den wenigsten Fällen ausreichend hohe Ca-Konzentration, um eine Gipsbildung zu ermöglichen. Die Ca-Konzentration kann sich aber durch den „lösenden“ Angriff des Betons in der Kontaktfläche zum Beton und insbesondere in Haarrissen sehr schnell erhöhen und das thermodynamische Gips-Gleichgewicht erreichen und seine sprengende Wirkung entfalten. Beton-Korrosion in Verbindung mit Grundwasser ist ein sehr komplexes Thema, das in der Langzeitverwahrung von toxischen Rückständen incl. radioaktiver Abfälle [5] eine große Rolle spielt und auch die Bildung von Biofilmen beeinflusst wird [6]. In diesen Bereichen gesammelte Erfahrungen können auch für geothermische Anwendung von Bergbauwässern genutzt werden.

Im Bereich der geothermischen Nutzung von Bergbauwässern stellt die Bildung von mineralischen Ausfällungen ein weiteres großes Thema dar, denn der kontinuierliche Betrieb kann dadurch erheblich gestört werden. Solche als Scales bezeichneten Ausfällungen bilden sich häufig auf Grenzflächen (z. B. metallischen Oberflächen) in Form von aufwachsenden dünnen Schichten. Als Folge dieser Ausfällungen muss der Betrieb zeitweise unterbrochen werden und die Ausfällungen z.B. durch mechanische oder chemische Behandlungen entfernt werden oder bestimmte Anlagenteile (Pumpen, Filter, Wärmetauscher) auch erneuert werden. Dies ist mit Kosten und Ausfallzeiten verbunden.

Zu Ausfällungen kann es kommen, wenn das Bergbauwasser insgesamt oder an einer bestimmten Stelle durch Veränderungen der Randbedingungen (Druck, Temperatur, Gasgehalt) bezüglich einer bestimmten Mineralphase thermodynamisch übersättigt ist. Bei Kenntnis der kompletten Wasserchemie (Konzentration aller Inhaltsstoffe incl. der Gaskonzentrationen) kann aus diesen Daten der Sättigungsindex (SI) für nahezu jedes Mineral thermodynamisch unter Nutzung eines geeigneten thermodynamischen Datensatzes berechnet werden [7]. Ein $SI > 0$ signalisiert eine Übersättigung bezüglich des jeweiligen Minerals; aber ob es zu einer Ausfällung kommt, ist damit nicht gesagt. Einerseits gibt es Minerale, die bei den gegebenen Temperaturen und Druckbedingungen nicht ausfallen und andererseits kann die Ausfällungsreaktion extrem langsam sein, sodass es für den Betrieb einer geothermischen Wärmenutzungsanlage unbedeutend ist. Es ist somit für jedes potentiell übersättigtes Mineral wichtig, die Kinetik der Ausfällung an Hand von Zeitraten zu kennen, so wie es auch für die Lösung von Mineralen durch ein Wasser einer bestimmten Zusammensetzung auch von Bedeutung ist, falls der $SI < 0$ ist und somit die Tendenz zur Lösung des Minerals gegeben ist und dieses Mineral im Gesamtsystem auch vorhanden ist. Typische Ausfällungen sind in Abhängigkeit von der Wasserchemie und den Randbedingungen Hydroxide, Oxide, Sulfate, Sulfide, Carbonate, SiO_2 , Silikate und Tonminerale. Tonminerale und Hydroxide bilden in der Regel aber keine Scales, sondern befinden sich als feinste Partikel oder Flocken im Wasser und können zum Zusetzen von Filtern bzw. der Beschädigung von Pumpen führen. Zur Untersuchung kommen üblicherweise XRD (Röntgendiffraktometrie), XRF (Röntgenfluoreszenz) und REM (Rasterelektronen-Mikroskop) zum Einsatz.

Als Alternative zur mechanischen und chemischen Entfernung von Scales gibt es auch die Möglichkeit durch kontinuierliche Maßnahmen, die Entstehung von Scales zu verhindern. Verschiedene Methoden sind denkbar und weltweit im Einsatz: Veränderung des pH-Wertes z.B. durch kontinuierliche Zugabe einer Säure (z.B. CO_2), Zugabe von Ausfällungsinhibitoren [8] oder durch Optimierung des Temperaturmanagements. Denkbar ist auch die Anwendung von Ultraschall, um Einfluss auf die Ausfällungskinetik zu nehmen [9].

5. Fazit

Die Nutzung von Bergbauwasser für geothermische Anwendungen ist im Vergleich zur Nutzung von Grund- und Thermalwasser vergleichsweise neu. Es sind aber weltweit zurzeit Aktivitäten und Forschungsprojekte in dieser Richtung festzustellen. Dies hat natürlich auch damit zu tun, dass es weltweit im zunehmenden Maße Bergbaugebiete gibt, die aufgegeben und geflutet wurden. Im Vergleich zu anderen und insbesondere tiefen Geothermie-Projekten sind die Temperaturen vergleichsweise niedrig ($< 50^\circ C$) und diese Wässer sind daher nicht für die Verstromung geeignet.

Eine besondere Herausforderung stellt häufig die Wasserchemie dar. Sie ist einerseits von Gebiet zu Gebiet sehr unterschiedlich und kann auch innerhalb eines Bergbaugesbietes stark variieren. Dies kann sich auch in Temperatur- und Dichteschichtungen ausdrücken und somit eine besondere Herausforderung darstellen. Wie in jedem Geothermie Projekt stellt sich auch bei der Nutzung von Bergbauwasser die Frage der Nachhaltigkeit. Geothermie wird zwar grundsätzlich als alternative und „erneuerbare“ Energie bezeichnet. Inwieweit die Nachhaltigkeit aber im eigentlichen Sinne des Wortes gegeben ist, hängt von vielen Faktoren in einem Projekt ab [10]. Nur eine sorgfältige und gewissenhafte Prüfung, Planung und wissenschaftliche Begleitung kann ein Garant für eine nachhaltige energetische und sonstige Nutzung der Ressource sein.

Literatur

- [1] J. López, M. Reig, O. Gibert und J. Cortina, „Recovery of sulphuric acid and added value metals (Zn, Cu and rare earths) from acidic mine waters using nanofiltration membranes,“ Separation and Purification Technology, Bd. 212, pp. 180-190, 2019.
- [2] D. Nordstrom, C. Alpers, C. Ptacek und D. Blowes, „Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California,“ Environmental Science and Technology, Bd. 34, Nr. 2, pp. 254-258, 2000.
- [3] Werner Stumm; James Morgan, Aquatic chemistry, 3rd Hrsg., Wiley, 1970.
- [4] J. Wang, H. Gangarao, R. Liang und W. Liu, „Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review,“ Journal of Reinforced Plastics and Composites, Bd. 35, Nr. 3, pp. 179-211, 2016.
- [5] J. Göske, H. Pöllmann und R. Wenda, „Ettringit- und Thaumassitreiben in Betonwerkstoffen: Analytische Betrachtung und Ursachenermittlung mittels Röntgendiffraktometrie und Rasterelektronenmikroskopie,“ Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 102, Nr. 5, pp. 321-329, 1 5 2007.
- [6] G. Littlejohn, D. Bruce, C. Brawner, O. Olivier, A. Swart und M. Wells, „Recommendations for site investigation, design, construction, testing, monitoring and maintenance of permanent intruded concrete plugs,“ Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Bd. 106, Nr. 5, pp. 367-371, 2006.
- [7] J. Márquez, M. Sanchez-Silva und J. Husserl, „Review of reinforced concrete biodeterioration mechanisms,“ in Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013, 2013.
- [8] B. Merkel, B. Planer-Friedrich und D. Nordstrom, Groundwater geochemistry (Second Edition): A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems, 2008.
- [9] Q. Han, X. Peng und Y. Yang, Influence of emulsion on the corrosion and scaling on pipelines of cooling system deep coal mine: A experiment study, Bd. 902, 2014, pp. 105-110.
- [10] M. Andhika und S. Regenspurg, Characterization of silica precipitation kinetics under high temperature geothermal field conditions using ultrasonic techniques, 2013.
- [11] L. Rybach und M. Mongillo, „Geothermal sustainability-A review with identified research needs,“ in Transactions - Geothermal Resources Council, 2006.