

Energetische Nutzung von Grubenwässern und der Einfluss der Wasserbeschaffenheit auf den Anlagenbetrieb

M.Sc. Bastian Wenzke¹, Dipl.-Geoök. Maria Ussath², Dr.-Ing. Thomas Grab¹ und Prof. Dr.-Ing. Tobias Fieback¹

¹ Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg

² Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 1a, 09599 Freiberg

Keywords: Grubenwasser, Geothermie, Wasserchemie, Wärmeübertrager, Fouling, VODAMIN II

Zusammenfassung

Grubenwasser stellt eine Sonderform der Nutzung geothermischer Nutzung dar, da eine Anwendung zwangsläufig an die Lage von Bergbaugebieten gebunden ist. Damit steht gegenüber der klassischen Geothermie eine bedeutend kleinere Fläche zur Energiegewinnung zur Verfügung, wodurch eine geringere installierte Gesamtleistung resultiert. So betrug der Anteil der durch Grubenwasser bereitgestellten an der gesamten durch Geothermie erzeugten Wärmemenge im bergbaugeprägten Bundesland Sachsen im Jahr 2010 nur etwa 0,1 % (Sächsisches Oberbergamt 2011). Die Arbeit gibt eine Übersicht zu diesen sächsischen Grubenwassergeothermieanlagen. Wenngleich die Standorte für die Errichtung von Grubenwasseranlagen lokal begrenzt sind, bieten sich für potenzielle Anwender in (ehemaligen) Bergbaugebieten jedoch besondere Möglichkeiten, um die Energiebereitstellung mithilfe von Grubenwässern zu großen Teilen regenerativ und grundlastfähig zu realisieren und damit vom Standortfaktor zu profitieren. Da die vorliegende Wassersituation und die technische Umsetzung maßgeblich von der Art der Lagerstätte und damit vom Aufbau des Bergwerks sowie dessen zeitlichen Zustand abhängen, werden im Rahmen dieses Beitrags die Varianten möglicher Wasserentnahmestellen sowie –rückführungen vorgestellt. Weiterhin werden die Grundtypen der technischen Realisierungen für Geothermieanlagen im untertägigen Bergbau aufgeführt. Da die Verwendung von Grubenwässern durch den Kontakt mit dem Erdreich einen maßgeblichen Einfluss auf den Anlagenbetrieb (Fouling) besitzen kann, werden außerdem Ergebnisse der Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten im realen Betrieb vorgestellt.

1. Einleitung

Die energetische Nutzung von Grubenwässern, aus aktiven oder stillgelegten untertägigen Bergbauten sowie von gehobenen Wässern in Tagebauten, ermöglicht eine regenerative und grundlastfähige Energiebereitstellung zur Gebäude- oder Prozessheizung bzw. –kühlung. Hierbei können teilweise große, niederthermale Wärmemengen genutzt werden. Diese ergeben sich aus im Bergwerk zusammengeführten bzw. durch Flutung gestaute Wassermengen in Kombination mit einer großen, durch Menschenhand geschaffenen, wärmeübertragenden Fläche zwischen Wasser und Gestein. Weiterhin kann z. T. bestehende bergbauliche Infrastruktur genutzt werden, um die Energie aus dem Erdreich zu gewinnen. Teilweise können untertägige Bereiche noch vor der Realisierung erkundet werden, weshalb das Fündigkeitsrisiko im Allgemeinen gering ist (Grab, Storch und Groß 2018). Aufgrund dieser Vorteile wurde sich unter anderem in den (ehemaligen) Bergbaugebieten Sachsens für die Errichtung von Grubenwassergeothermieanlagen entschieden, wobei verschiedene technische Konzepte angewendet werden. Diese sind in Abb. 1 dargestellt (Stand 01.10.2018).

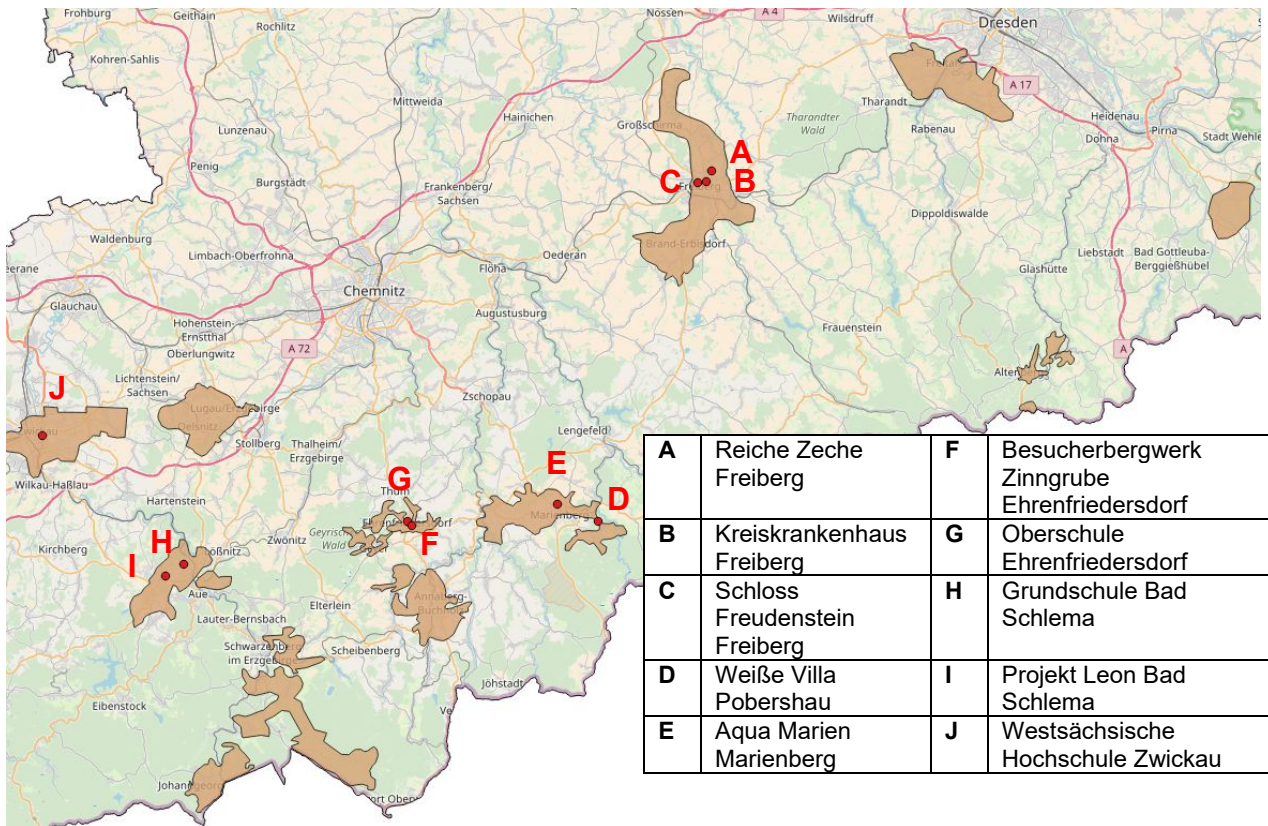


Abb. 1: Übersicht sächsischer Grubenwassergeothermieanlagen (rote Markierungen) im Openstreetmapplayer, große Bergbaugebiete (braune Markierungen) nach Hohlraumkarte SMWA Sachsen

Gleichzeitig bringen jedoch die chemische Beschaffenheit des mit dem Untergrund in Kontakt stehenden Wassers und dessen mit der Energiebereitstellung verbundene Temperaturänderung Problemstellungen mit sich, welche sich in Kombination mit weiteren Betriebsparametern auf den Anlagenbetrieb auswirken können.

2. Anlagenkonzepte

Grubenwassergeothermieanlagen sind oftmals Einzelanfertigungen, da das Grubenwasser als Energieträgermedium je nach Art der Lagerstätte und bergbaulicher Situation in unterschiedlichen Formen und Mengen zur Verfügung steht. Auch der Transport der hierbei genutzten Energie an entsprechende Abnehmer kann auf verschiedenste Wege realisiert werden, welche jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Um die im Grubenwasser gespeicherte Energie nutzen zu können, bedarf es außerdem übermäßig installierter Technik, welche oftmals auch in Kombination mit anderen Energieträgern sinnvoll ausgelegt werden muss.

2.1 Bergbauliche Situation, Wasserentnahmestellen und Rückführung

Bergwerke wurden und werden in Abhängigkeit von der vorliegenden Lagerstätte angelegt, um die Rohstoffe entsprechend zu gewinnen. So unterscheiden sich bspw. Erz-, Salz-, oder Kohlebergbaue, untertägig oder im Tagebau, grundlegend in ihrer Form. Auch in Abhängigkeit von den jeweiligen geologischen Gegebenheiten unterscheiden sich die Bergwerke, in denen gleiche Rohstoff abgebaut werden, sodass unterschiedlichste Teufen mit entsprechenden

Temperaturniveaus erschlossen werden. Auch das Alter der jeweiligen Bergbaustrukturen, die allgemeine Zugänglichkeit sowie die Art und Weise der Verfahrung bei der Stilllegung von Bergwerken und ggf. die Nachnutzung oder Nachbehandlung ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Entsprechend vielfältig sind auch die Möglichkeiten, Wasser zu entnehmen bzw. diese nach der Nutzung zu entlassen. In Abhängigkeit vom zeitlichen Stadium des Bergwerks können im untertägigen Bergbau folgende Grundtypen von Wasserentnahmestellen und Rückführungen unterschieden werden, wobei eine aufgegebene und geflutete Grube als Beispiel gewählt wird (vgl. Abb. 2):

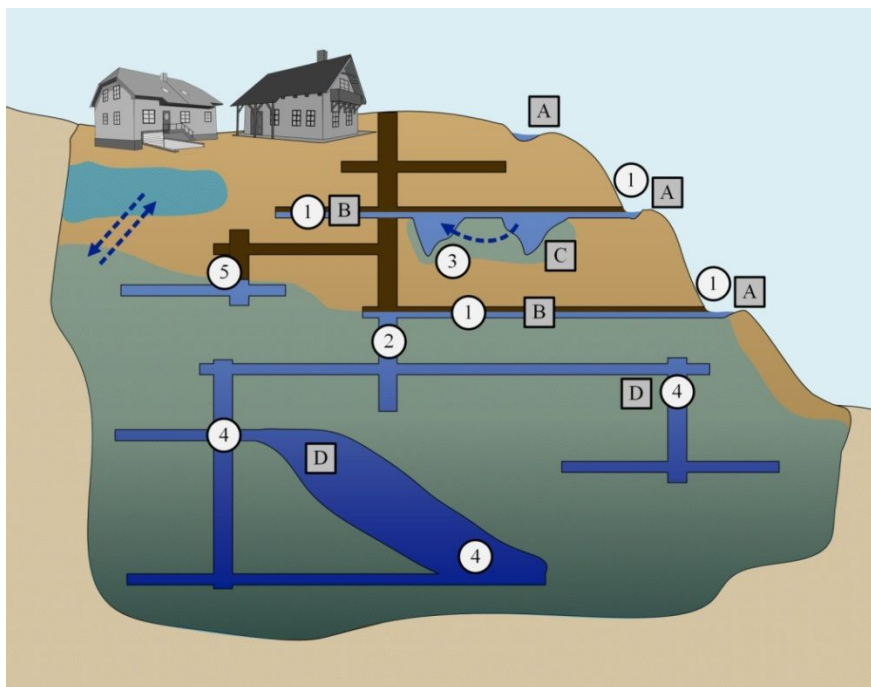


Abb. 2: Möglichkeiten der Wasserentnahme und Wasserrückführung im untertägigen Bergbau

1) Wasserlösestollen/ Entwässerungstollen:

Je nach Lagerstätte wurden zur Wasserableitung im aktiven Bergbau teilweise Wasserlösestollen angelegt. Auch nach der Schließung fallen hier natürlich ins Grubengebäude eindringende Wässer an, welche mithilfe von Stollen abgeführt werden. In diesen erfolgt eine Sammlung des durch Niederschläge oder Überläufe eingebrachten Wassers. Durch die Wasserlösestollen wird im Allgemeinen der Grundwasserspiegel verändert, sodass dieser nach dem Abwurf und der Grubenflutung in größeren Teufen vorzufinden ist. Wenn auf das Anlegen dieser Stollen verzichtet wird oder aus topografischen Gründen nicht möglich ist, erfolgt die Entwässerung mithilfe von Pumpen. In Abhängigkeit der zu erschließenden Teufe sind auch beide Strategien kombinierbar. Da das oftmals diffus eintretende Oberflächenwasser natürlich in den Stollen gesammelt wird, stellen diese prinzipiell eine gute Möglichkeit dar, Wasser zur Energiebereitstellung zu entnehmen, da teilweise sehr hohe Volumenströme verfügbar sind. Je nach klimatischen Bedingungen ist der Durchfluss von der Jahreszeit abhängig. Wasser aus besonders flach angelegten Stollen ist aus diesem Grund teilweise nicht ohne weiteres (z. B. Anstauung) nutzbar. Das Temperaturniveau entspricht im Allgemeinen dem des umgebenden Gesteins. Prinzipiell ist es bei der Nutzung von Wasser aus Entwässerungstollen möglich, das Wasser an den Austrittsröschchen an der Tagesoberfläche zu entnehmen. Hierbei muss kein vertikaler Transport stattfinden, wodurch ein energetisch günstiger Zustand vorliegt, da das durch das Gestein erwärmte Wasser mit einem minimalen Pumpaufwand genutzt werden kann.

2) Schächte:

Das Grubenwasser kann weiterhin aus teilweise oder vollständig mit wassererfüllten Schächten entnommen werden. Dazu ist auch die Durchbohrung von Verfüllmaterial denkbar, sofern sichergestellt werden kann, dass es zu keinen unkontrollierten Wasseraustritten kommt. Der Vorteil bei der Verwendung von Schachtwässern liegt darin, dass sich das Temperaturprofil oftmals vom umgebenden Gestein unterscheidet. Durch temperaturbedingte Dichteunterschiede, welche aus der vorliegenden geothermischen Tiefenstufe resultieren, kommt es zur natürlichen Konvektion im Schacht. Hieraus resultiert ein geringerer Pumpaufwand, da das Wasser aus einer geringeren Teufe entnommen werden kann. Weiterhin lässt sich der Bohraufwand reduzieren, da im bereits abgeteuften Schacht das Gestein bereits entfernt ist, sodass Rohrleitungen direkt in die bergbaulich geschaffene Struktur eingebracht werden können.

3) Wasserverfüllte Hohlräume oberhalb des Flutungspegels:

In der Grube können sich stehende wassererfüllte Hohlräume (unterirdische Seen) ausbilden, die von wasserdurchlässigem Gestein umgeben sind und sich bei Entnahme durch Zuflüsse, unter Beachtung von Regenerationszeiten, wieder füllen. Hierzu ist eine hydraulische Verbindung an angrenzende Bergwerksbereiche, entweder durch bergmännisch erschlossenen Hohlraum oder das Gestein selbst, erforderlich, um eine Regeneration zu ermöglichen.

4) Tiefe geflutete Grubenbaue:

Nach Einstellung der Rohstoffförderung und damit dem Abwurf der Grube geht oft die Einstellung der Wasserhebung einher. In diesem Zuge kommt es zum Fluten der unterhalb des Grundwasserspiegels befindlichen Bergbaustrukturen. Aufgrund der Teufe liegen hierbei im Allgemeinen höhere Wassertemperaturen vor. Sofern eine gute hydraulische Kommunikation vorhanden ist, d. h. wenig Verfüllung oder Verbrauch von Schächten und Stollen existiert oder das umgebende Gestein eine hohe Wasserdurchlässigkeit aufweist, kann unter Beachtung der Rückführung bzw. des Gesamtzulaufs ins Grubengebäude eine hohe Wassermenge entnommen werden. Aus dem hohen Wärmeübergang vom Gestein auf das Wasser durch relativ große bergbaulich geschaffene Kontaktflächen in Verbindung mit einer guten Durchmischung im Wasserkörper resultiert hierbei eine entsprechend hohe thermische Regeneration. Oftmals sind Tiefenwässer verglichen mit den durch Infiltration eingetragenen Wässern von einer höheren Mineralisation geprägt.

5) Abgepumpte Wässer:

Neben den oben genannten Entnahmestellen können weiterhin diejenigen Wässer genutzt werden, die zwangsweise in einem Bergwerk gehoben werden müssen. Dies kann Wasser in einem aktiven Bergwerk zur Ermöglichung der Rohstoffförderung sein, so z. B. auch in einem Braunkohletagebau. Auch nach Ende des Bergbaus müssen oftmals entsprechende Anstrengungen unternommen werden, damit das Bergwerkswasser keine Gefahr für die Umwelt darstellt. Zum Teil müssen Grubenwässer bei bergbaubedingten Senkungen der Tagesoberfläche und nach Flutung der Grube dauerhaft abgepumpt werden, wenn der sich einstellende Grundwasserspiegel oberhalb oder in Höhe der Geländeoberkannte liegt und es so zu Vernässungen oder Überflutung der Oberfläche kommen kann. Weiterhin können auch die Mineralisation bzw. der Salzgehalt oder sonstige Rückstände wie Öl im Grubenwasser dazu führen, dass Grund- oder Oberflächenwässer in nicht tolerierbaren Maß beeinflusst werden können. Oftmals muss neben dem Pumpvorgang auch eine Wasserbehandlung durchgeführt werden. Diese Maßnahmen sind oftmals sehr kostenintensiv, wobei gleichzeitig kaum ein finanzieller Nutzen erzielt werden kann. Sofern eine entsprechende Abnehmerstruktur vorhanden ist, bietet sich hierzu eine energetische Nutzung in besonderem Maße an, da hierfür notwendige Bohrungen, Verrohrungen und Pumpentechnik oftmals bereits installiert sind.

Auch bei der Abgabe der Wässer nach einer energetischen Nutzung (Senke) existieren verschiedene Möglichkeiten.

A) Oberflächengewässer:

Gehobene Grubenwässer können in einem offenen System in Oberflächengewässer abgegeben werden. Hierzu sind im Gegensatz zu allen anderen Varianten der Wasserabgabe keine zusätzlichen Bohrungen bzw. Leitungen ins Erdreich notwendig. Nachteilig wirkt sich hierbei jedoch aus, dass die Grube künstlich leer gepumpt wird, d. h. es muss beachtet werden, dass im gesamten Grubengebäude noch genügend Wasser zufließt bzw. eingeleitet wird, sodass sich der Wasserspiegel nicht senkt. Weiterhin sind unbedingt gesetzliche Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Mitunter ist Menge des nutzbaren Wassers damit auch von Pegelständen der Oberflächengewässer abhängig.

B) Wasserlösestollen/ Entwässerungstollen:

Neben der Entnahme aus Wasserlösestollen ist auch die Einleitung in diese möglich. Hierbei können die entsprechende Förder- und Schluckleitung in einer gemeinsamen Bohrung abgeteuft werden, sofern die Wasserentnahme ebenfalls aus diesem Stollen erfolgt. Damit kann die maximale zur Verfügung stehende Wassermenge im Stollen genutzt werden, da die entnommene und abgegebene Wassermenge zwangsläufig gleich groß ist. Zweckmäßigerweise muss die Stelle der Wasserabgabe der genutzten Wässer in Fließrichtung unterhalb der Entnahmestelle liegen.

C) Bergwerksbereiche mit hydraulischer Kommunikation zur Entnahmestelle:

Analog dazu ist es möglich, dass Wasser in Bergwerksbereiche einzuleiten, die durch entsprechende Wasserdurchlässigkeiten des Gebirges ein Rückfließen zur Entnahmestelle ermöglichen. Hierbei muss zwingend darauf geachtet werden, dass sich die beiden Punkte in ausreichender Entfernung zueinander befinden, um eine thermische Regeneration durch eine Wärmeabgabe bzw. -aufnahme des Gesteins zu ermöglichen.

D) Geflutete Grubenteile:

Zusätzlich ist es möglich, das Wasser in tiefere Grubenbaue einzuleiten, welche nicht direkt zur Tagesoberfläche hin entwässern. In Kombination mit Entnahmevariante 4 ist es somit möglich, die Tiefenwässer mit erhöhten Temperaturen mit einem möglichst hohen Wassermassestrom zu nutzen, da sich somit der Grubenwasserspiegel nicht senkt. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass eine zusätzliche, mitunter tiefe Schluckbohrung abgeteuft werden muss. Hierbei ist sicherzustellen, dass eine hydraulische Kommunikation mit der Entnahmestelle vorliegt.

Alle oben genannten Nutzungsmöglichkeiten gehen davon aus, ausschließlich natürlich ins Grubengebäude eintretende Wässer zu nutzen. Eine künstliche Einbringung von Oberflächenwasser wurde bisher nicht aufgeführt. Hierbei würde sich der Vorteil ergeben, dass größere Wassermengen nach Erwärmung im Berg für die Nutzung in einem offenen System zur Verfügung stehen und damit bei ausreichender thermischer Regeneration erhöhte Wärmemengen entnommen werden können. Nachteilig ist hierbei allerdings, dass die Oberflächensituation beeinflusst wird und zusätzliche Schleusen eingerichtet werden müssen. In jedem Falle zieht diese Nutzungsvariante tieferführende Betrachtungen mit sich, da die Wasserhaltung im Bergwerk stark beeinflusst werden würde.

2.2 Energietransport, Wärme- und Kältetechnik

Je nach Aufbau und Zustand des Bergwerks und damit den in Kapitel 2.1 aufgeführten Möglichkeiten der Wasserentnahmestellen, bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der technischen Realisierung von Grubenwassergeothermieanlagen (vgl. Abb. 2). Je nach angewendetem Konzept resultieren entsprechende Vor- und Nachteile.

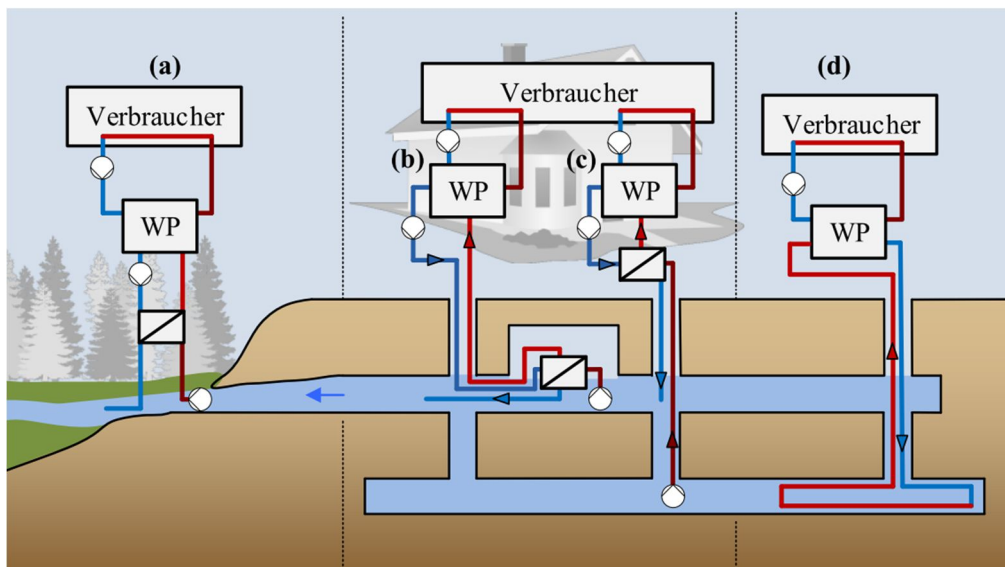


Abb. 3: Wärme- und Kältegewinnungskonzepte bei der Nutzung von Grubenwässern, nach Grab, Storch und Groß 2018

Grundlegend wird für die Heizanwendung im üblicherweise vorliegenden Temperaturbereich der Wasser (ca. 8 – 30 °C) der Einsatz entsprechender Wärmepumpentechnik notwendig. Hieraus ergibt sich die zentrale Fragestellung, wie die Energie aus dem Grubenwasser bis zum Heizkreis transportiert wird.

a) Offenes System, gesamte Technik über Tage:

Eine verhältnismäßig komfortable Variante stellt die Nutzung von aus Mundlöchern von Wasserlösestollen austretenden Wässern dar. Hierbei wird das Wasser beim Durchgang durch den Berg erwärmt und durch die Schwerkraft an der Bergflanke natürlich zur Oberfläche hin entwässert. Generell ergeben sich an dieser Stelle auch die größten nutzbaren Wassermengen entlang des gesamten Stollens. Damit muss für die Verwendung des erwärmten Wassers keine Technik direkt ins Bergwerk eingebracht werden bzw. Bohrungen abgeteuft werden, wodurch sich verhältnismäßig geringe Kosten bei der Erschließung sowie der Errichtung, dem Betrieb und der Instandhaltung der Anlage ergeben. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass die nutzungsbedingte Temperaturänderung bis zur Einleitung in die Vorflut durch geothermische Regenerationsprozesse nicht ausgeglichen werden kann. Da der Austritt aus dem Berg geografisch nur einen Punkt darstellt, ergibt sich weiterhin nur eine relativ geringe Anzahl potenzieller Nutzer. Um eine größere Abnehmerstruktur zu erzielen ist es deshalb oftmals notwendig, weitere Bergwerksbereiche technisch zu erschließen.

b) Offenes System, Verrohrung mit Pumptechnik unter Tage, Wärmeübertrager unter Tage:

Sofern im Bergwerk nicht geflutete Bereiche existieren, die auch nach Stilllegung noch sicher begehbar sind, ist es möglich, Wärmeübertrager unter Tage zu positionieren. Damit ergibt sich der Vorteil, dass das Wasser in einem geschlossenen Kreislauf über Tage gefördert werden kann. Dies stellt den energetisch günstigeren Zustand im Vergleich zu einem direkten Transport an die

Tagesoberfläche in einem offenen System dar, da hierbei nur die Druckverluste innerhalb der Rohrleitung durch die Pumpentechnik energetisch kompensiert werden müssen. Somit gehen bei dieser Variante geringere Betriebskosten für den Energietransport einher. Nachteilig wirkt sich allerdings die aufwendigere Installation sowie Instandhaltung der unter Tage verbauten Technik aus.

c) Offenes System, Verrohrung mit Pumpentechnik unter Tage, Wärmeübertrager über Tage:
Oftmals ist es nicht möglich, notwendige Wärmeübertrager unter Tage zu positionieren, z. B. durch Verbruch des Grubengebäudes oder einen sich einstellenden Flutungspegel, welcher bis in die Nähe der Geländeoberkante reicht. In diesem Fall muss das Grubenwasser in einem offenen System über Tage gehoben werden. Sofern die kinetische Energie bei der Wiedereinleitung der Grubenwässer durch entsprechende Turbinentechnik nicht genutzt wird bzw. das Wasser in Vorfluter abgegeben wird, ist hierzu ein höherer Energieaufwand für den Transport der Wärmeübertragermedien als bei Variante b) zu verzeichnen. Gleichzeitig ergeben sich jedoch bei einer möglicherweise notwendigen Reinigung Vorteile, da ein einfacherer Zugang möglich ist.

d) Geschlossenes System:

Die im Grubenwasser gespeicherte Energie kann weiterhin in einem komplett geschlossenen System genutzt werden. Hierzu kann auf den Einbau eines gesonderten Wärmeübertragers verzichtet werden, wodurch Übertragungsverluste von einem Grubenwasser- auf einen entsprechenden Zwischenkreislauf vermieden werden. Die Wärmeübertragung selbst erfolgt über die Fläche der ins Bergwerk eingebrachten Rohrleitung, welche von einem Kältemittel durchflossen wird. Wenn die Anlage nur zur Heizanwendung betrieben wird, kann durch den Einsatz eines gravitationsbedingten Thermosiphon-Prinzips bei entsprechender Positionierung des Rohrsystems auch pumpenlos Energie transportiert werden. Nachteilig hierbei wirken sich allerdings die Einbringung relativ langer Rohrleitungen und die Nutzung von u. U. umweltgefährdenden Kältemitteln bei Leckage aus (Grab, Storch, Groß & Wagner 2010, Grab, Storch und Groß 2018).

3. Einfluss der Wasserchemie auf den Anlagenbetrieb – Untersuchungsergebnisse und Prognosen zur Ablagerungsbildung

Je nach Lagerstätte, Art des umgebenden Gesteins, Verweilzeit des Wassers oder physikalischen Umgebungsbedingungen ergibt sich eine charakteristische chemische Beschaffenheit des Grubenwassers. Auch innerhalb eines Bergwerks sind mitunter deutliche Unterschiede vorzufinden. Die gelösten und ungelösten Frachten können dazu führen, dass in Kombination mit der Betriebsweise der Anlage die Funktionsfähigkeit, besonders die von verbauten Wärmeübertragern, durch die Ausbildung mehr oder minder fest haftenden Schichten/Belägen beeinträchtigt wird. Eine Steigerung des Druckverlusts und damit Erhöhung des Pumpaufwands bzw. Senkung der übertragenen Wärme aufgrund reduzierter Volumenströme oder eines verringerten Wärmedurchgangs innerhalb wärmeübertragender Bauteile sind Beispiele dafür. Hierzu ergibt sich maßgeblich die Fragestellung, in wie weit das vorliegende Wasser für eine energetische Nutzung geeignet ist und welche Vorkehrungen getroffen werden sollten, um einen möglichst zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Die bei der Energiegewinnung stattfindende Temperaturänderung ist ein entscheidender Faktor bei der Ablagerungsbildung. Hierbei kann es zur Überschreitung von Löslichkeiten kommen, wodurch Mineralphasen ausfallen können. Diese können sich zudem nach anfänglicher Keimstellenbildung an den Wärmeübertragerflächen anlagern.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden u. a. an Grubenwassergeothermieanlagen im Erzgebirge dahingehende Untersuchungen durchgeführt.

In Abb. 4 ist eine Übersicht der Zusammensetzung des Wassers aufgeführt, welches eine Anlage in der ehemaligen Zinnlagerstätte Ehrenfriedersdorf zur Energiebereitstellung nutzt. Hierbei ist ein Konzept nach Variante b) (vgl. Kapitel 2.2) umgesetzt.

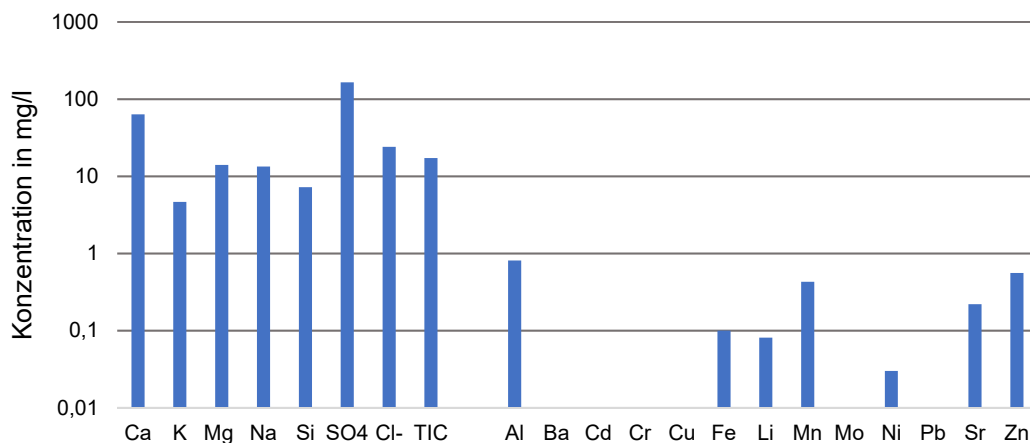


Abb. 4: Chemische Wasserzusammensetzung im Besucherbergwerk Zinngrube Ehrenfriedersdorf, ausgewählte Parameter (2018)

Über die Laufzeit bewirken die im Wasser gelösten sowie mitgeführten Stoffe in Kombination mit der Änderung der physikalischen Parameter wie Druck- oder Temperaturänderung, dass es zu Ausfällungen und in Folge chemisch-physikalischer Wechselwirkungen mit der Feststoffoberfläche zu Anhaftungen an den Wärmeübertrageroberflächen kommt (vgl. Abb. 5).



Abb. 5: Foulingrückstände auf Wärmeübertragerplatten vor mechanischer Reinigung

Hierbei kann ein im Wesentlichen zweischichtiger Aufbau der Foulingrückstände festgestellt werden. Den Großteil der Ablagerung wird dabei von einer hell- bis dunkelbraunen Schicht ausgefüllt, welche große Teile des ursprünglichen Strömungsquerschnittes einnimmt. Diese ist relativ weich und kann durch mechanische Methoden, z. B. Hochdruckreinigung oder Luftspülungen, entfernt werden. Im Anschluss wird eine zweite Schicht fest anhaftender Ablagerungen mit braun-schwarzer Färbung sichtbar, welche relativ stark an der Wärmeübertragerplatte haftet und mit mechanischer Hochdruckreinigung nicht zu entfernen ist (vgl. Abb. 6).



Abb. 6: Foulingrückstände auf Wärmeübertragerplatte nach mechanischer Reinigung

Zur Untersuchung der Foulingschichten werden zwei Analysemethoden angewandt: Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (nRFA) und Sequentielle Extraktion (SE).

Durch eine mehrgängige Strömungsführung im Wärmeübertrager ergeben sich entlang der Strömungsrichtung je nach Position unterschiedliche Temperaturen des Grubenwassers sowie unterschiedliche Wandtemperaturen. Im grubenwasserseitigen Zulaufbereich des Wärmeübertragers liegt eine Wassertemperatur von ca. 11 °C, vor, während dessen im Ablaufbereich infolge der Wärmeübertragung bei maximaler Übertragungsleistung eine Temperatur von 5 °C erreicht wird. In Abb. 7 sind die Ergebnisse der Feststoffanalysen, welche mittels Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie bestimmt wurden, für die beiden Bereiche im Wärmeübertrager vor und nach der Reinigung dargestellt.

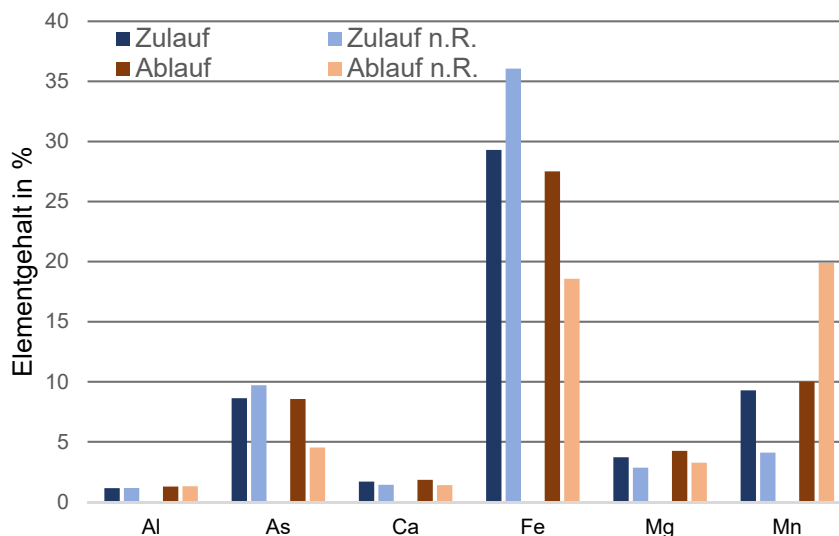


Abb. 7: Hauptsächliche Elementgehalte der im Betrieb ausgebildeten Foulingschicht, Messung mittels Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie im Zu- und Ablaufbereich des Wärmeübertragers, jeweils vor und nach der Reinigung (n. R.)

Hieraus wird ersichtlich, dass die obere Schicht (vgl. Abb. 5) zu ca. 30% aus Eisen in den Verbindungen besteht, wodurch sich die charakteristische Färbung ergibt. Weiterhin sind mit ca. 10% Arsen sowie Mangan Schwermetalle in den Verbindungen enthalten. Außerdem sind Aluminium, Calcium und Magnesium in der Schicht enthalten. Innerhalb dieser Schicht sind kaum Unterschiede im Elementgehalt entlang der Stromlinien (Position im Wärmeübertrager) festzustellen, sodass von einer relativ homogenen chemischen Zusammensetzung innerhalb des Wärmeübertragers ausgegangen werden kann. Hingegen ergeben sich beim Betrachten der zweiten Schicht nach Reinigung (n. R.) Unterschiede. Währenddessen im Zulaufbereich

(Grubenwasser mit höherer Temperatur bzw. geringerer Unterkühlung) mit einem Eisengehalt von >35 % vor Arsen (ca. 10%) und Mangan (ca. 4%) den größten Anteil an Metallen in den Verbindungen enthält, betragen im Ablaufbereich (geringe Grubenwassertemperatur und damit größere Unterkühlung) die Anteile von Eisen sowie Mangan in den Verbindungen jeweils ca. 20%. Daraus wird ersichtlich, dass bei stärkerer Abkühlung des unter Abb. 4 aufgeführten Wassers besonders mit der Ausfällung und Anhaftung von Manganverbindungen zu rechnen ist, welche sich bei einer mechanischen Reinigung entsprechend schwerer von der Feststoffoberfläche lösen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass trotz des relativ geringen Eisengehalts von 0,1 mg/l im Wasser mit Ausfällung und Anhaftung von Eisenverbindungen gerechnet werden muss, wodurch ein dauerhafter Betrieb ohne Reinigung nicht möglich ist. Aus diesem Grund müssen bei der Planung entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Reinigung zu ermöglichen. Gemäß den wirtschaftlichen Gegebenheiten ist auch eine Wasservorbereitung denkbar.

Fazit und Ausblick

Je nach chemischer Beschaffenheit der Wässer ergibt sich in Abhängigkeit nach Entnahmestelle (vgl. Kapitel 2.1) sowie chemisch-physikalischen Betriebsbedingungen (Temperaturänderung, Sauerstoffkontakt o.ä.) eine unterschiedliche Neigung zur Ausbildung von Anhaftungen. Um vor Installation einer Grubenwassergeothermieanlage anhand von Wasseranalysen derartige Ausfällungen und damit verbundenen Reinigungsaufwand abschätzen zu können, werden im Rahmen des sächsisch-tschechien Projekts VODAMIN II neben den Untersuchungen zur Chemie der Grubenwässer und Foulingschichten weiterhin wasserchemische Modellierung durchgeführt. Hierbei werden u.a. Sättigungsindizes verschiedener Mineralphasen bestimmt, um somit auf die Neigung zur Ausfällung und Bildung fester Schichten auf Anlagenkomponenten bei Änderung physikalischer Umgebungsbedingungen zu schließen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden mit den Feststoffanalysen verglichen, welche sich im realen Anlagenbetrieb ausbilden. Weiterhin werden im Labormaßstab sowie im realen Anlagenbetrieb unterschiedliche Materialien und Oberflächenbeschichtungen im Hinblick auf verschiedene Oberflächenenergien und sich damit einstellenden Foulingrückständen untersucht. Weiterhin wird ein Anlagenmonitoring fünf verschiedener Grubenwassergeothermieanlagen durchgeführt, um unterschiedliche Anlagenkonzepte vergleichen zu können. Weitere Informationen sowie aktuelle Entwicklungen zum Projekt sind unter

<https://geothermie.iwt.tu-freiberg.de>

einsehbar.

Danksagung

Wir danken der Sächsischen Aufbaubank im Rahmen des Kooperationsprogramms „Freistaat Sachsen-Tschechische Republik 2014-2020“ für die finanzielle Förderung des Projekts VODAMIN II. Zudem gilt unser Dank der Zinngrube Ehrenfriedersdorf, Besucherbergwerk & Mineralogisches Museum GmbH für die gute Zusammenarbeit und die Ermöglichung der Untersuchungen an der Grubenwassergeothermieanlage.



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



Quellenangaben

SÄCHSISCHES OBERBERGAMT.: Der Bergbau in Sachsen, Bericht des Sächsischen Oberbergamtes und des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Referat Rohstoffgeologie) für das Jahr 2010 (2011).

GRAB, T., STORCH, T. & GROß, U.: Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken in BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H. & NEU, T.: Handbuch Oberflächennahe Geothermie ISBN 978-3-662-50306-5, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg (2018).

GRAB, T., STORCH, T., GROß, U. & WAGNER S.: Performance of geothermal thermosyphons using propane in Heat Pipe Science and Technology, An International Journal, Bd. 2, Nr. 1-4, S. 43-53, issn: 2151-7975 (2011).

Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 7, 09599 Freiberg
Bastian.Wenzke@ttd.tu-freiberg.de, Maria.Ussath@tu-freiberg.de, Thomas.Grab@ttd.tu-freiberg.de, fieback@ttd.tu-freiberg.de