

Grubenwassergeothermie als innovative Energiequelle – Status quo und Ergebnisse aus fünf Jahren Monitoring

Lukas Oppelt, Sebastian Pose, Thomas Grab, Tobias Fieback

TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für technische Thermodynamik

Keywords: heat exchanger, heat pump, abandoned mines, mine water, district heating and cooling

Zusammenfassung

Stillgelegte Bergwerke bieten eine Möglichkeit zur regenerativen Energiebereitstellung. Aufgrund von ganzjährig nahezu konstanten Temperaturen und der großen Gesteinsflächen als wärmeübertragende Flächen ist Grubenwasser ideal zum Heizen und Kühlen einsetzbar. An Standorten an denen auch nach Beendigung des Bergbaus noch Grundwässer gehoben werden müssen z.B. im Ruhrgebiet, kann das an die Erdoberfläche gepumpte Wasser noch energetisch genutzt werden und bietet damit einen positiven Zusatzeffekt der Ewigkeitsaufgabe.

In Deutschland wurden bisher vor allem in Sachsen Grubenwassergeothermieanlagen gebaut und in Betrieb genommen. Nun werden auch im Ruhrgebiet weitere Anlagen installiert. Es wird ein Überblick über weltweit bestehende, geplante und stillgelegte Anlagen gegeben. Es konnten aktuell insgesamt 42 aktive Grubenwassergeothermieanlagen weltweit recherchiert werden. Diese haben eine gesamte Heizleistung von 195 MW und eine Gesamtkühlleistung von 2,5 MW.

Eine konkrete Anlage ist die Anlage „Reiche Zeche“ im sächsischen Freiberg, die mehrere Universitätsgebäude ganzjährig mit Wärme und Kälte versorgt. Dabei werden seit 2015 umfangreich Messwerte erfasst. Es zeigt sich, dass durch die Kombination von Wärme- und Kältebereitstellung eine hohe Anlageneffektivität mit Arbeitszahlen des Gesamtsystems von über 7 möglich sind. Darüber hinaus werden Herausforderungen und Probleme der Grubenwassergeothermieanlage dargestellt. Da das Grubenwasser mineralisiert ist, kommt es zu Ablagerungen im Wärmeübertrager zwischen Grubenwasser- und Zwischenkreislauf. Die Effizienz der Anlage wird dabei wesentlich reduziert.

1. Einleitung

Seit September 2016 arbeiten deutsche und tschechische Firmen sowie Forschungseinrichtungen in den im Rahmen des Kooperationsprogramms des Freistaates Sachsen und der Tschechischen Republik durch die Europäische Union geförderten Projekte VODAMIN II (SAB-Antragsnummer: 100304269) und GeoMAP (SAB-Antragsnummer: 100348899) gemeinsam an Themen zum grenzübergreifenden Gewässerschutz sowie dem Gefährdungs- und Nutzungspotenzial von Grubenwässern.

Eine wesentliche Nutzungsmöglichkeit für Grubenwasser ist die energetische Nutzung zum Heizen und Kühlen, denn Grubenwasser weist ganzjährig ein nahezu konstantes Temperaturniveau auf und unterliegt kaum jahreszeitlichen Schwankungen. Das umliegende Gestein wirkt hier als große wärmeübertragende Fläche.

An vielen ehemaligen Bergbaustandorten ist es notwendig Grubenwässer zwangsweise zu pumpen, z.B. um eine Dekontaminierung von Grundwasser, ein Absinken oder eine Verwässerung der Oberfläche zu verhindern. Eine solche aktive Wasserhaltung muss beispielsweise im Ruhrgebiet betrieben werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin das Wasser aus Wasserlösestollen zu entnehmen, diese Variante wurde im sächsischen Freiberg umgesetzt.

Bei vielen Anlagen ist das Temperaturniveau des Grubenwassers allerdings nicht ausreichend, in diesem Fall wird eine Wärmepumpe eingesetzt. Um eine Verschmutzung von Anlagenbestandteilen wie der Wärmepumpe zu verhindern wird dabei in den meisten Fällen ein geschlossener Zwischenkreislauf zwischen Grubenwasser und Heiz-, bzw. Kühlkreislauf installiert. Die Wärme aus dem Grubenwasser wird dabei in Wärmeübertragern an das Fluid im Zwischenkreislauf abgegeben (siehe Abb. 1).

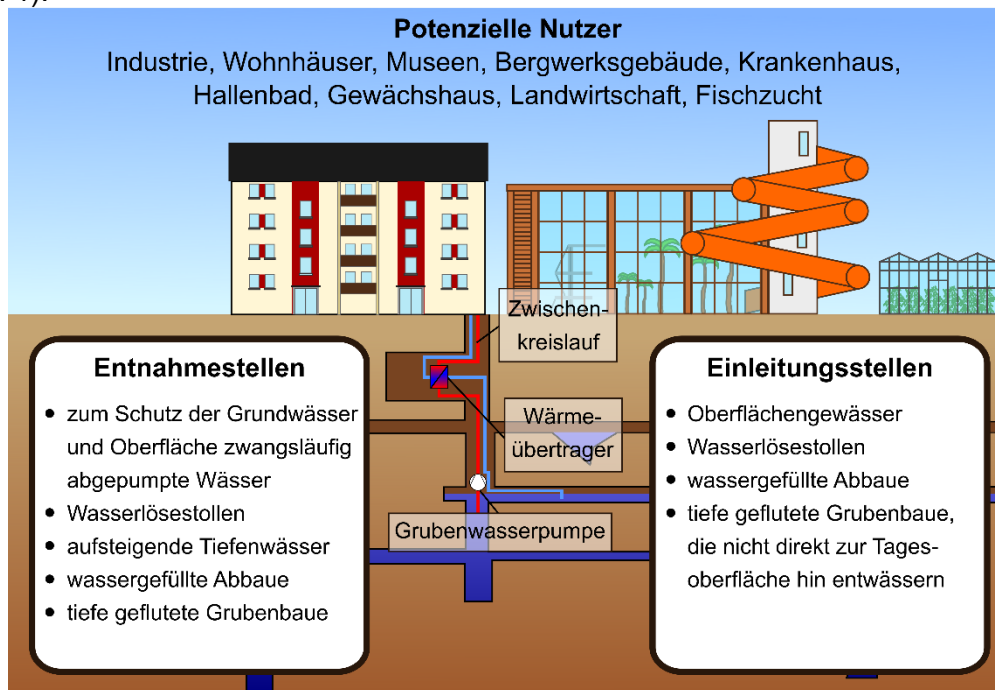


Abb. 1 Grundprinzip Grubenwassergeothermie sowie mögliche Entnahme-, Einleitungsstellen und potenzielle Nutzer (nach Oppelt et al. 2020)

Je nach Standort und möglichem Temperaturniveau ergeben sich eine Vielzahl möglicher Anwender, beispielsweise können unmittelbar die Gebäude des Bergwerks beheizt werden. Aber auch die Nutzung in Industriebetrieben, Schwimmbädern oder ganzen Quartieren ist möglich. Eine weitere interessante Möglichkeit bietet, u.a. aufgrund des gleichmäßigen Wärmebedarfs, die Nutzung von Grubenwasser zur Beheizung von Gewächshäusern.

2. Grubenwassergeothermie weltweit

Seit den 80er Jahren wird Grubenwasser energetisch genutzt. Eine der ersten Anlagen wurde 1981 in Kingston (Pennsylvania) in Betrieb genommen (Korb 2012). Abb. 2 zeigt die Standorte der bestehenden, stillgelegten und geplanten Grubenwassergeothermieanlagen in Europa und Nordamerika. Darüber hinaus werden auch die im Bau befindlichen Anlagen sowie konkrete Standortstudien mit aufgeführt.

Es wird deutlich, dass bisher vor allem in Deutschland, Großbritannien und den USA Grubenwasser energetisch genutzt wird.

In Deutschland wurde 1984 in Essen eine der ersten Anlagen in Betrieb genommen, diese diente zur Beheizung eines Seniorenheims (Wieber and Ofner 2008; Wieber and Pohl 2008). Von den derzeit 18 aktiven Anlagen in Deutschland befinden sich 10 im Erzgebirge. Dort ist der Strukturwandel weiter fortgeschritten als im Ruhrgebiet, wo aktuell für viele Standorte mögliche Konzepte erarbeitet und Anlagen geplant werden.

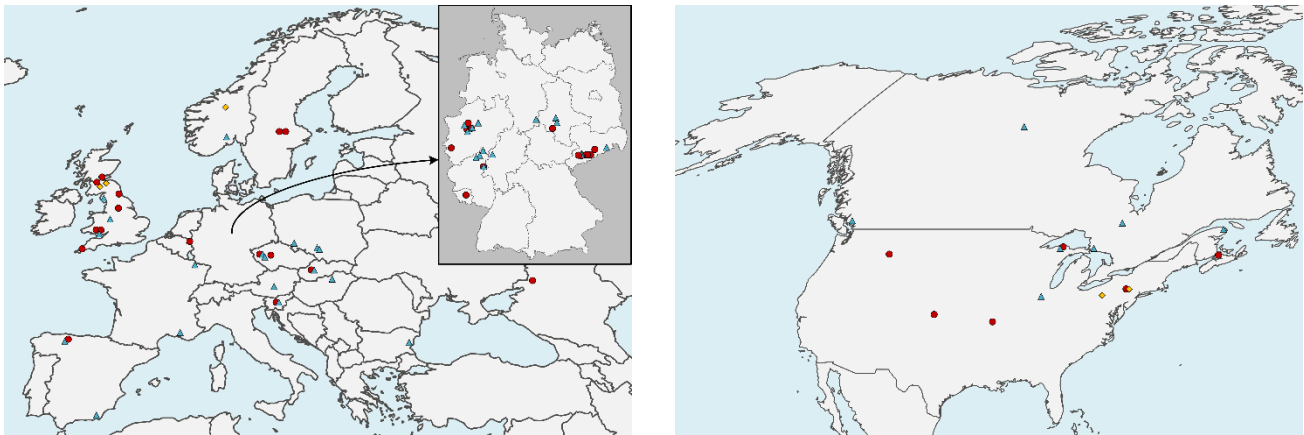


Abb. 2 Übersicht über Grubenwassergeothermieranlagen in Europa (links) und Nordamerika (rechts)
(Anlagen in Betrieb ●, Anlagen nach Betrieb stillgelegt ◆, Anlagen in Bau/ Planung/ Studie ▲)(nach Grab et al. 2018)

Die neun größten Anlagen der Welt sortiert nach Heizleistung (Leistung der Wärmepumpe inklusive) sind in Tab. 1 aufgeführt, dabei ist auch Deutschland mit fünf Anlagen vertreten. Insgesamt liegt ein Großteil der weltweit existierenden Anlagen im Leistungsbereich von unter 200 kW, allerdings ist ein Trend zu größeren Anlagen, wie der in Mieres (Spanien) zu erkennen (Grab et al. 2018). Die gesamte theoretische Heizleistung von allen recherchierten Anlagen weltweit beträgt rund 195 MW und für das Kühlen 2,5 MW.

Tab. 1 Standorte und Kennwerte der Grubenwasseranlagen mit der höchsten Heizleistung weltweit

| Name | Ort | Land | Abnehmer | Ressource | Heizleistung in kW | Quelle |
|----------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|-----------|--------------------|---|
| HUNOSA's mines in Cuenca Central | Mieres, Asturien | ES | Universität | Kohle | 160 700 | (Loredo et al. 2011; Ordóñez et al. 2010) |
| | Novoshakhtinsk, Rostov Region | RU | Mehrere Gebäude | Kohle | 10 900 | (Joint Implementation Supervisory Committee 2007) |
| Zhang-shuanglou Coal Mine | Xuzhou City | CN | Mehrere Gebäude | Kohle | 4 750 | (Guo et al. 2017) |
| Wismut-Schacht 302 | Marienberg | DE | Schwimmbad | Uran | 1 700 | (Lagerpusch 2010; Wieber and Ofner 2008) |
| Rothschönberger Stollen | Freiberg | DE | Krankenhaus | Silber | 860 | (Johnson Controls; Ulbricht 2013) |
| Zeche Robert Müser | Bochum | DE | u.a. Schulen | Kohle | 690 | (Willmes and Bückner 2014) |
| Tagebau Hambach | Bergheim | DE | Mehrere Gebäude | Kohle | 620 | (EnergieAgentur NRW 2014; Thien 2015) |
| Steinkohlerevier | Zwickau | DE | Hochschule | Kohle | 600 | (Röder 2012; Sunbeam GmbH 2013) |
| Hachov-Plana | Marienbad | CZ | Schule | Uran | 550 | (Wolf et al. 2007) |

In Abb. 3 ist die Entwicklung der Grubenwassergeothermieranlagen weltweit im Vergleich zum Öl-Preis in US-Dollar/Barrel gezeigt wobei ein Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Ölpreises und der Planung, bzw. der darauf zeitversetzt folgenden Inbetriebnahme, zu erkennen ist. Der Öl-Preis stellt dabei einen Indikator für das Preisniveau aller fossiler Ressourcen dar und wenn fossile Energieträger wie Gas teurer werden, wird die Nutzung regenerativer Energien wie Grubenwassergeothermie auch wirtschaftlich attraktiver. Neben diesen treibenden wirtschaftlichen Faktoren ist zu berücksichtigen, dass in Europa und insbesondere in Deutschland auch politisch eine Änderung des Energiemixes hin zur vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien forciert wurde. Zudem hat die Klimapolitik und CO₂-Einsparung gesellschaftlich ebenfalls an Relevanz gewonnen womit diese Faktoren somit ebenfalls Einfluss auf einen Ausbau der Grubenwassergeothermie haben.

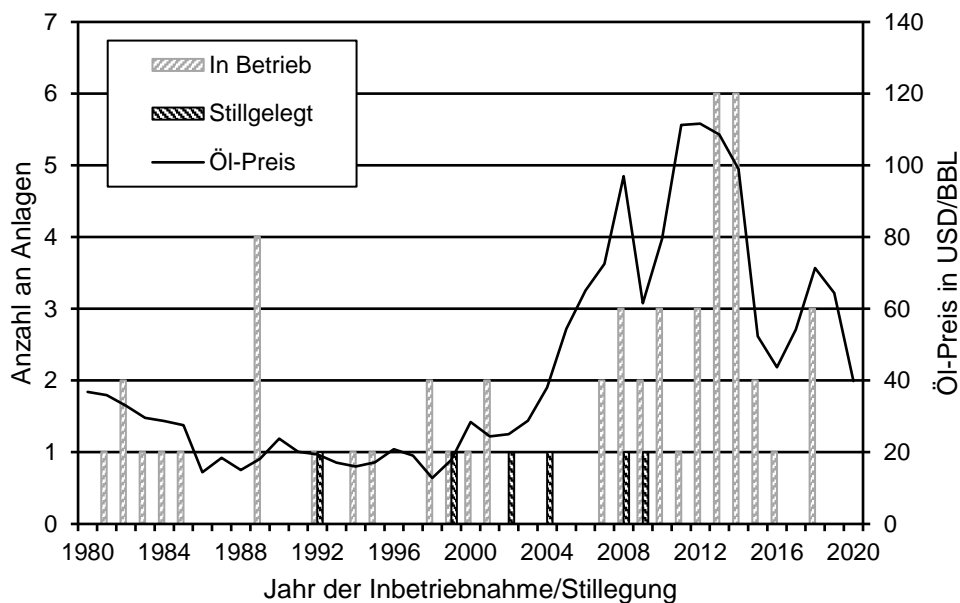


Abb. 3 Gegenüberstellung der in Betrieb genommenen und stillgelegten Grubenwassergeothermieranlagen zum Öl-Preis

2. Ergebnisse aus 5 Jahren Monitoring

Seit 2013 ist im Sächsischen Freiberg die Grubenwassergeothermieranlage Reiche Zeche aktiv. Die Anlage dient dabei zum Heizen und Kühlen mehrerer Universitätsgebäude mit einer maximalen Heizleistung von 175 kW und einer maximalen Kühlleistung von 100 kW in der aktuellen Ausbaustufe. Eine Besonderheit der Anlage ist im Schema in Abb. 4 zu sehen: Es existieren zwei mögliche Entnahmestellen für Grubenwasser. Aus dem Hauptentwässerungsstollen des Freiburger Reviers, dem Rothschnöberger Stolln, kann 14 °C warmes Grubenwasser entnommen werden. Dieses soll vordergründig bei überwiegendem Kühlbedarf genutzt werden (Sommerbetrieb). Aus dem Schacht Reiche Zeche steigen Tiefenwässer mit höherer Temperatur von ca. 19 °C auf, die bei überwiegendem Heizbedarf verwendet werden sollen (Winterbetrieb). Außerdem existiert als drittes die Möglichkeit nur das Fluid im Zwischenkreislauf zwischen Wärmeübertrager untertage und Heiz- bzw. Kühlkreislauf zirkulieren zu lassen, da bei geringem Heiz- bzw. Kühlbedarf die Wärmeaufnahme bzw. -abgabe zum umliegenden Gestein bereits ausreichend sein kann. Für den Heizbetrieb wird das Temperaturniveau durch den Einsatz von Wärmepumpen angehoben, für den Kühlbetrieb kann es direkt eingesetzt werden.

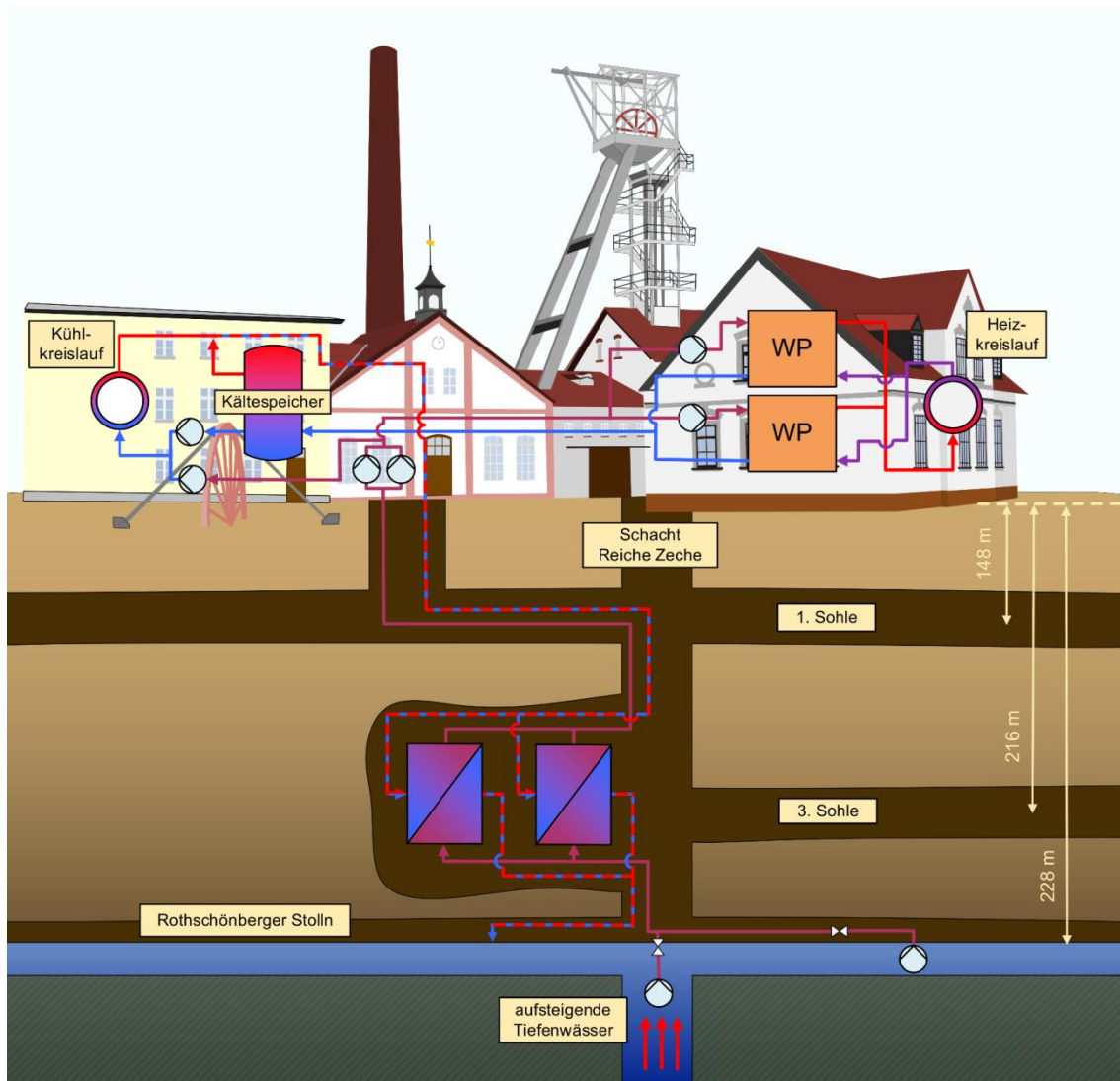


Abb. 4 Betriebsschema der Grubenwassergeothermieanlage der Reichen Zeche in Freiberg

Außerdem wird das im Heizkreislauf abgekühlte Fluid (Rücklauf) in einem Kältespeicher gespeichert und dann ebenfalls zur Kühlung eingesetzt.

In Abb. 5 sind für eine Winterwoche im Februar 2016 die Kälte- und Wärmemengen (Nutzen), die notwendige elektrische Energiemenge (Aufwand) sowie die Arbeitszahl des Gesamtsystems dargestellt. Die Arbeitszahl berücksichtigt als Aufwand neben dem elektrischen Bedarf der Wärmepumpe auch den der Grubenwasser- und Umwälzpumpen sowie der Messtechnik. Aus der Abbildung wird deutlich, dass eine leichte Korrelation zwischen Außentemperatur und Heiz- bzw. Kühlbedarf vorliegt. Die etwas wärmeren Außentemperaturen ab Freitag führen zu einem geringeren Heizwärme- und höheren Kühlbedarf, dadurch steigen auch die Arbeitszahlen auf über 4 an. Der Vorteil in dem kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb besteht darin, dass das Grubenwasser sowieso für die Heizanwendung gefördert werden muss. Die Kühlanwendung erfolgt dann ohne zusätzlichen Aufwand für die Wärmepumpen, die Leistung der Umwälz- und Grubenwasserpumpen steigt geringfügig an. Die Nachnutzung der Heizenergie zum Kühlen über den Kältespeicher stellt einen weiteren wesentlichen Benefit der Anlage dar. In der betrachteten Woche wird regelmäßig zwischen der Nutzung des wärmeren Wassers aus der Reichen Zeche und der ausschließlichen

Zirkulation im Zwischenkreislauf gewechselt. In diesem Betrieb fällt kein elektrischer Aufwand für Grubenwasserpumpen an, so werden im Winter- und in der Übergangszeit im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb regelmäßig Arbeitszahlen von über 4 erreicht.

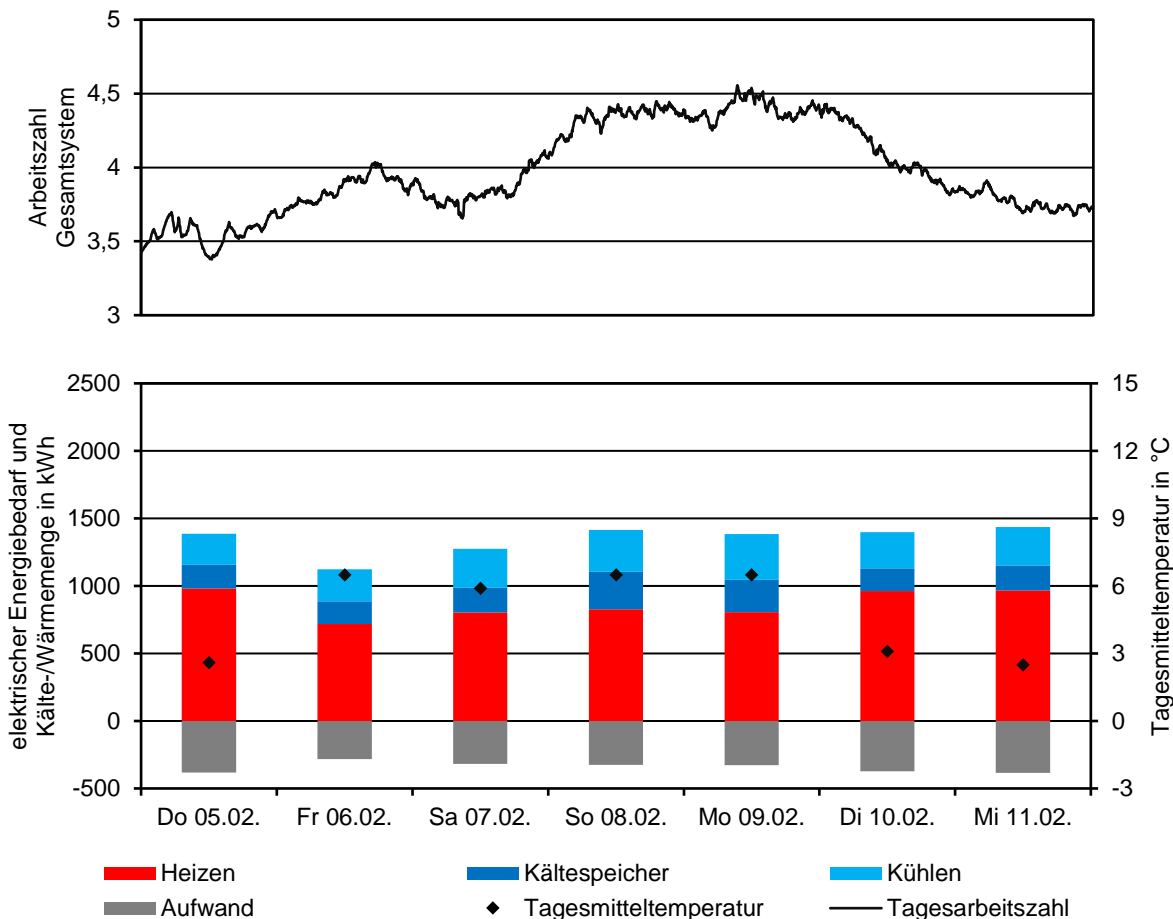


Abb. 5 Energiemengen und Arbeitszahlen im Verlauf einer Woche im Winter 2016

Sehr effektiv läuft die Anlage auch im Sommer, wenn nahezu nur Kältebedarf vorliegt. Beispielsweise zeigte das Monitoring in einer Sommerwoche 2018 bei einem Anteil des Kältebedarfs am Gesamtenergiebedarf von über 95 % Arbeitszahlen des Gesamtsystems zwischen 7 und 10. Das Wasser wird dabei durchgehend aus dem Rotschönberger Stolln entnommen und direkt zum Kühlen eingesetzt, so dass kein elektrischer Aufwand für die Wärmepumpen notwendig ist. In 5 Jahren Monitoring wurden auch verschiedene Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten für die Anlage ersichtlich. Die Effektivität der Anlage wird beispielsweise wesentlich durch geringe Laufzeiten beeinflusst, die Wärmepumpen laufen oft nur im Teillastbereich. Das heißt es könnten theoretisch mehr Abnehmer mit Wärme versorgt werden. Auch die Temperaturdifferenz des Grubenwassers, d. h. die Abkühlung (im Heizbetrieb), bzw. Erwärmung (im Kühlbetrieb) liegt oft bei unter 1 K, somit wäre auch hier theoretisch eine Erhöhung möglich, wenn die Energie dann auch abgenommen wird.

Ein weiteres Problem war der Defekt der automatischen Umstellung zwischen den beiden Grubenwasserentnahmemöglichkeiten. Dadurch musste zeitweise auch im Winter das kühlere Wasser aus dem Rotschönberger Stolln zum Heizen verwendet werden. Demnach besteht hier ebenfalls noch Optimierungspotenzial bei der Betriebsweise.

Die Analyse des Anlagenbetriebs zeigt, dass Grubenwassergeothermie eine sinnvolle Möglichkeit zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Wärme- und Kältebereitstellung bietet. Die Anlagen lohnen sich solange ein effektiver Betrieb ermöglicht wird. Zu beachten gilt es dabei vor allem, dass Stillstandzeiten vermieden werden und wenn möglich sowohl geheizt als auch gekühlt wird.

Ein zusätzlich betrachtetes, zentrales Problem der Grubenwassergeothermieanlagen ist die Bildung von Ablagerungen und Verschmutzungen durch im Grubenwasser mitgeführte Frachten (Fouling). Durch die Installation des Zwischenkreislaufs werden Verschmutzungen in der Wärmepumpe verhindert, bilden sich aber stattdessen im Wärmeübertrager, wodurch der Druckverlust steigt und die übertragene Wärmemenge reduziert wird. Oft sind die Wärmeübertrager als Plattenwärmeübertrager ausgeführt, und können so geöffnet und gereinigt werden, was aber stets mit entsprechendem Wartungsaufwand und –kosten verbunden. Erschwerend kommt da hinzu, dass die Wärmeübertrager oft untertage installiert sind, was Aufwand und Kosten noch weiter erhöht. In Abb. 6 ist der Verlauf des Druckverlustes über den Wärmeübertrager für einen Zeitraum von 4 Monaten dargestellt. Innerhalb dieses Zeitraums musste dieser zweimal chemisch und mechanisch gereinigt werden.

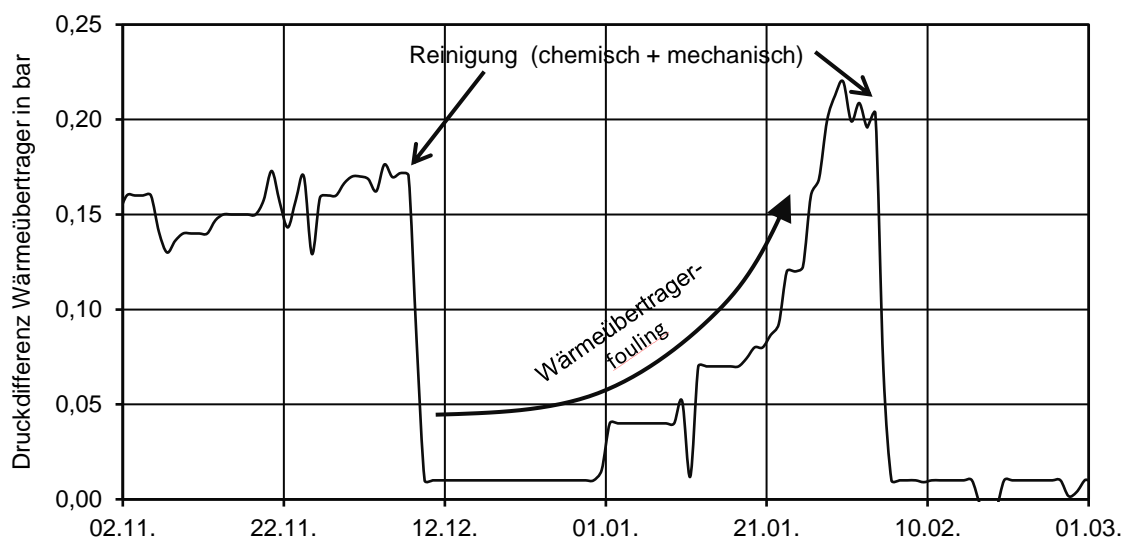


Abb. 6 Druckverlust über den Wärmeübertrager an der Grubenwassergeothermieanlage Reiche Zeche (Betrachtungszeitraum 02.11.2015-01.03.2016)

Zudem führt auch eine Reinigung nicht dazu, dass der Ursprungszustand wieder erreicht wird. Dies zeigt der Vergleich einer unbenutzten, verschmutzten und nach einer Verschmutzung gereinigten Platte in Abb. 7.



Abb. 7 Gegenüberstellung einer unbenutzten, verschmutzten und gereinigten Wärmeübertragerplatte

Durch die Problematik des Foulings wird die Anlageneffektivität wesentlich beeinflusst. Es kann nicht ganzjährig die geplante Energiemenge aus dem Grubenwasser entnommen werden, zudem entstehen durch Reinigungs- und Wartungsarbeiten Stillstandzeiten. Hier müssen standortspezifisch Maßnahmen entwickelt und erprobt werden um das Fouling zu reduzieren.

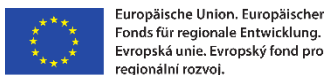
3. Zusammenfassung

Grubenwassergeothermie stellt eine innovative und regenerative Alternative für die Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie dar. Weltweit existieren aktuell 42 Anlagen und an weiteren Standorten wurden konkrete Potenzialstudien erstellt und teilweise auch mit dem Bau begonnen. Dennoch bestehen weitere Potenziale die noch nicht genutzt werden.

Das Monitoring einer bestehenden Anlage zeigt, dass eine hohe Anlageneffektivität mit regelmäßigen Arbeitszahlen von über 4 und temporären Arbeitszahlen von bis zu 10 bereits möglich ist. Jedoch läuft die Anlage zu oft nur in Teillast oder fällt durch Defekte ganz aus. Ein wesentliches Problem ist dabei auch das Fouling in den Wärmeübertragern zwischen Grubenwasser und Zwischenkreislauf, durch die Verschmutzung erhöht sich der Druckverlust und die übertragene Wärmemenge wird reduziert. Damit sind erheblicher Wartungsaufwand und Kosten verbunden, außerdem muss die Anlage für eine Reinigung außer Betrieb genommen werden. In Zukunft gilt es hier Maßnahmen zu entwickeln die das Fouling vermeiden oder zumindest die Wartungsintervalle deutlich vergrößern.

Danksagung

Wir danken der Europäischen Union und dem Freistaat Sachsen für die finanzielle Unterstützung der Projekte VODAMIN II (SAB-Antragsnummer: 100304269) und GeoMAP (SAB-Antragsnummer: 100348899). Zudem gilt unser Dank allen beteiligten Technikern und Studenten.



Quellenangaben

- Grab T, Storch T, Groß U (2018) Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken. In: Bauer M, Freeden W, Jacobi H, Neu T (eds) Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 523–586
- Guo P, He M, Zheng L, Zhang N (2017) A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines. Applied Thermal Engineering 116:833–839.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.116>
- Johnson Controls Fallstudie - Hohe Heizkosten sind heilbar: Grubenwasser dient als Energiequelle für zweistufige Ammoniak-Wärmepumpe im Kreiskrankenhaus Freiberg.
http://www.johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts_case_study_hospital_freiberg_de.pdf. Accessed 10 September 2018
- Korb MC (2012) Minepool Geothermal in Pennsylvania. In: Department of Environmental Protection Pennsylvania (ed) 14th Conference on Abandoned Mine Reclamation: New Frontiers in Reclamation.
- Lagerpusch KH (2010) Stellenwert Bergbau - Geothermie in Sachsen. Workshop "Bergbau-Geothermie" im Rahmen der ReSource-Arbeitsgruppe "Natürliche Potentiale", Bad Schlema

- Loredo J, Ordóñez A, Jardón S, Álvarez R (2011) Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). In: Rüdte RT, Freund A, Wolkersdorfer C (eds) 11th International Mine Water Association Congress: Mine Water - Managing the Challenges, pp 177–181
- Oppelt L, Pose S, Grab T, Fieback T (2020) Geothermische Nutzung von Grubenwasser zur regenerativen Energieversorgung. *Geothermische Energie*:25–27
- Ordóñez A, Andres C, Alvarez R, Jardon S (2010) Harnessing groundwater as a water supply and energy resource. *Seguridad y medio ambiente* 30:43–60
- Röder U (2012) Geothermie im Fokus der Nachnutzung von Bergbaufolgelandschaften am Beispiel des Zwickauer Steinholenreviers: Geothermische Nutzung von Flutungswässern
- Sunbeam GmbH (2013) Forschung für Energieeffizienz: Projekt: Geothermische Nutzung von Grubenwässern zur Nahwärmeversorgung. <http://www.eneff-stadt.info/de/pdf/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/geothermische-nutzung-von-grubenwaessern-zur-nahwaermeversorgung/>. Accessed 21 January 2013
- Thien L (2015) Geothermal Re-use of Coal Mining Infrastructures and Mine Water in Hard Coal Mining in the Ruhr Area/Germany: Paper-ID: 28017. In: International Geothermal Association IGA (ed) Proc. of World Geothermal Congress 2015
- Ulbricht S (2013) Wieder Pionierrolle für Freiberg: Projekt "Energetische Optimierung im Kreiskrankenhaus Freiberg" nutzt Warmwasser des Supertunnels. *Wochenspiegel - regional*:3
- Wieber G, Ofner C (2008) Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke. *bbr Jahresmagazin*
- Wieber G, Pohl S (2008) Mine Water: A Source of Geothermal Energy - Examples from the Rhenish Massif. In: Rapantova N, Hrkal Z (eds) Proc. 10th Int. Mine Water Association Congress, pp 113–116
- Willmes J, Bücken C (2014) Nutzung von Grubenwasser zur Wärmeerzeugung: eine Projektbeispiel. *bbr Sonderheft Geothermie* 2014:46–52
- Wolf P, Lagerpusch KH, Hofmann K (2007) Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen. *Sächsischer Geothermietag Spezial: Geothermie und Bergbau, Marienberg*

Kontakt

Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Oppelt
 TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für technische Thermodynamik,
 Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg
 Lukas.Oppelt@ttd.tu-freiberg.de