

## Herausforderungen bei der energetischen Nutzung von Grubenwässern und dem Einsatz eines mobilen Wärmeübertragersversuchsstandes

**Sebastian Pose, Thomas Grab, Marlies Grimmer, Lisa-Marie Wilde, Tobias Fieback**

TU Bergakademie Freiberg

**Keywords:** Grubenwasser, Geothermie, Wärmeübertrager, Ablagerungen, Fouling, Erdwärmenutzung, Plattenwärmeübertrager

### Zusammenfassung

Mit der Einstellung des Bergbaus kommt es häufig zu einem Wiederanstieg des Grund- und Grubenwassers. Dieser Prozess birgt eine Reihe von Problemen, welche von der Verunreinigung des Grundwassers bis hin zu Hebungen und Senkungen an der Oberfläche reichen. Entgegen dieser Gefahren bietet der unterirdische Wasserspeicher aber auch ein hohes thermisches Potential, welches regenerativ und ressourcenschonend zur Heizung und Kühlung unterschiedlicher Anlagen und Gebäuden genutzt werden kann.

Dabei kann es aufgrund der Grubenwasserchemie zur Bildung von Ablagerungen und Verunreinigungen (Fouling) auf den Anlagenteilen kommen. Problematisch sind diese vor allem in den Wärmeübertragern, da durch die Ablagerungen ein Leistungsabfall und somit eine sinkende Wirtschaftlichkeit zu verzeichnen ist. Im Rahmen des Projekts Vodamin II werden Untersuchungen zur Wasserchemie und den entstandenen Verunreinigungen durchgeführt. Aufgrund des kontinuierlichen Betriebs bestehender Grubenwasseranlagen lassen sich diese Untersuchungen nicht in definierten Zeitabständen repräsentativ durchführen.

Um das Problem der repräsentativen Probenahme zu lösen, wurde im Rahmen des Projektes GeoMAP ein mobiler Wärmeübertragersversuchsstand konstruiert und aufgebaut. Dieser bietet die Möglichkeit das vorhandene Gruben- und Grundwasser an unterschiedlichen Standorten sowohl für den Heiz- und Kühlbetrieb zu nutzen und zu beproben. Somit können während einer Testphase direkte und zuverlässige Aussagen über die zu erwartende Verschmutzung, notwendige Wartungsintervalle und empfohlene Betriebsweisen getroffen werden. Durch den Einsatz unterschiedlicher Plattenmaterialien und spezieller Beschichtungen in den Wärmeübertragern des Versuchsstands soll eine gezielte Verminderung der Foulingbildung getestet und bei der Auslegung der Wärmeübertrager berücksichtigt werden.

Im Freiburger Revier konnten vor allem zwei signifikant unterschiedliche Ablagerungen auf einer Wärmeübertragerplatte festgestellt werden. So gibt es eine braune, mechanisch leicht entfernbar, homogen verteilte, stark eisenhaltige Phase, sowie eine schwarze kristalline, nur chemisch zu lösende Phase mit erhöhtem Mangangehalt. Die Manganschicht ist entlang der Plattengeometrie ungleich verteilt. Durch die Untersuchung von Wasserproben sowie der Zusammensetzung von entstehenden Ablagerungen konnten 3 Foulingmechanismen als Ursache bestätigt werden. Dabei handelt es sich um Biofouling, Partikelfouling und Kristallisationsfouling. Für die beiden erstgenannten Mechanismen sind die Wasserparameter die Hauptursache. Das Kristallisationsfouling wird aktiv durch den Strömungsverlauf und die Geometrie verursacht, aufgrund der sich ändernden Druckzustände. Dies konnte durch die numerische Simulation der Strömung bei einer realen Plattengeometrie sowie der Strömungs- und Wärmeübertragersimulation bei einer vereinfachten Wärmeübertragerplatte bestätigt werden.

## **1. Einleitung**

Mit der Einstellung des Bergbaus kommt es häufig zu einem Wiederanstieg des Grundwassers. Dieser Prozess birgt eine Reihe von Problemen, welche von der Verunreinigung des Grundwassers bis hin zu Hebungen und Senkungen der Oberfläche reichen können. Entgegen diesen Gefahren bietet der unterirdische Wasserspeicher aber auch ein hohes thermisches Potential, welches regenerativ und ressourcenschonend zur Heizung und Kühlung unterschiedlicher Gebäuden und Anlagen genutzt werden kann.

Aufgrund des bereits im Jahre 1969 eingestellten Silberbergbau im Revier Freiberg ist die Flutung der Bergwerksanlagen bereits abgeschlossen. Somit steht in einer Tiefe von 228 m ein Volumenstrom von ca. 350 m<sup>3</sup>/h mit durchschnittlich 18 bis 20 °C im Schacht Reiche Zeche zur Verfügung. Im Freiburger Revier sind bereits 3 Grubenwassergeothermieanlagen realisiert und unterliegen einer regelmäßigen Wartung und Überwachung. In Ehrenfriedersdorf kommen noch einmal 2 Anlagen dazu.

Die Wartung ist notwendig, da es aufgrund der Grubenwasserchemie zur Bildung von Ablagerungen und Verunreinigungen auf den Anlagenteilen kommt. Problematisch sind diese vor allem in den Wärmeübertragern, da durch die Ablagerungen ein Leistungsabfall und somit eine sinkende Wirtschaftlichkeit zu verzeichnen ist. Im Rahmen des EU-Projekts Vodamin II werden Untersuchungen zur Wasserchemie und den entstehenden Verunreinigungen durchgeführt. Aufgrund des Betriebs der Anlagen lassen sich Untersuchungen nicht immer in definierten Zeitabständen repräsentativ durchführen.

Um dieses Problem zu lösen wurde ein mobiler Wärmeübertragersversuchsstand im Rahmen des Projektes GeoMAP konstruiert und aufgebaut. Dieser bietet die Möglichkeit das vorhandene Gruben- und Grundwasser direkt an unterschiedlichen Standorten zu nutzen und zu untersuchen. Somit können während einer kurzen Testphase direkte und zuverlässige Aussagen über die zu erwartende Verschmutzung, notwendige Wartungsintervalle, benötigte Materialien und Betriebsweisen getroffen werden. Durch den Einsatz unterschiedlicher Plattenmaterialien und spezielle Beschichtungen in den Wärmeübertragern des Versuchsstandes soll eine fundierte Auslegung und Auswahl für jeden einzelnen Standort getroffen werden. Weiterhin lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Grubenwasserchemismus und den auftretenden Ablagerungen herstellen. Somit soll sich zukünftig ohne den Einsatz einer Versuchsanlage das optimale Material und Betriebsverhalten der Grund- und Grubenwasseranlage mit Hilfe von Simulationen ableiten lassen.

## **2. Grundlagen der Grubenwassernutzung und Wasserchemie im Freiburger Revier**

Bei Grubenwasser handelt es sich um alle im Bergwerk anfallenden Wässer (Summe aus Oberflächen-; Sicker- und Grundwässer im Bergwerk). Diese lassen sich nach und während des aktiven Bergbaus nutzen. Im Falle des aktiven Bergbaus muss das Bergwerk von Grubenwasser freigepumpt werden (Wasserhaltung), welches energetisch verwertet werden kann. Bei einer Stilllegung des Bergwerksbetriebs kann es entweder zu einem Wiederanstieg des Grubenwassers oder zu einer dauerhaften Wasserhaltung kommen. Diese kann notwendig sein um den Schutz des Grundwassers, sowie der Bodenstabilität zu gewährleisten. Die dauerhafte Wasserhaltung kann natürlich durch Wasserlösestollen oder als Ewigkeitsaufgabe durch Pumpen realisiert werden. Für beide Szenarien gibt es vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für das Grubenwasser, welche sich wie folgt unterteilen:

Mögliche Nutzungsarten vor einer Flutung (T.Grab et al. 2018):

- Stromerzeugung z.B. im Kavernenkraftwerk (Galinsky et al. 2001; Ramos und Falcone 2013)
- Heizen und Kühlen von Bergbauegebäuden, -anlagen (Huber 1990), Wohnhäusern, Prozessen oder Bergbauschächten (Jensen 1983) unter Ausnutzung von stehenden / fließenden Wässern oder über eine thermische Zusatznutzung des geförderten Wassers aus Wasserhaltungsanlagen (Preene und Younger 2014)
- Ausnutzung der Hohlräume für den Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerke zur Speicherung von Überkapazitäten (Beck und Schmidt 2011);(Niemann 2012);(Ramos und Falkone 2013)
- Nutzung der Strömungsenergie der Luftbewegungen in Schächten in Aufwindkraftwerken aufgrund von Druckunterschieden zur Oberfläche (Gahlen 2009)
- Nutzung der Grubenluft zur Klimatisierung mit einer ganzjährig konstanten Temperatur und Luftfeuchte, sowie nahezu keim-, schadstoff- und staubfrei

Zusätzliche mögliche Nutzungsarten nach einer Flutung:

- geothermisches Heizen und Kühlen von Gebäuden, Bergwerksanlagen und Industrieprozessen (Jessop et al. 1995 ) (Ramos und Falcone 2013)(Preene 2014), mit/ ohne Wiedereinleitung in Grubenbau (mit/ohne Nutzung potentieller Energie in Turbine) (Huber 1990)
- Speicherung von Energie die aus erneuerbaren Quellen gewonnen wurde (z.B. thermische Solarenergie) (Schaberg 1998);(Eikmeier 2001);(Bracke 2015)

Dieser Beitrag ist auf die thermische Nutzung der Grubenwässer vor bzw. nach der Flutung von Bergwerken fokussiert. Das Temperaturniveau der üblichen zur thermischen Nutzung verwendeten Grubenwässern ist meist nicht zur direkten Beheizung geeignet. Somit ist die Verwendung einer Wärmepumpe notwendig, um eine variable Nutzung unterschiedlicher Temperaturbereiche zu garantieren.

Für den Wärmetransport (z.T. auch als Energieförderung bezeichnet) zur Wärmepumpe sind nach (Huber 1990) Varianten mit unterschiedlichen Anforderungen möglich. Dabei wird zwischen einem offenen und einem geschlossenen System unterschieden. Diese Unterscheidung bezieht sich auf den Kreislauf dem primär die Wärme entzogen wird. In Abb. 1 a-c wird dem Grubenwasser Wärme entzogen, indem es durch einen Wärmeübertrager geleitet wird. Dabei kann sich dieser unter sowie über Tage befinden. Je nach den vorhandenen Gegebenheiten gibt es für die einzelnen Varianten Vor- und Nachteile. Bei dem geschlossenen System erfolgt die Wärmeübertragung direkt im Grubengebäude ohne die Verwendung eines Wärmeübertrager, da dieser durch die Rohrleitung ersetzt wird, welche sich direkt im Grubenwasser befindet. Somit kann Anlagentechnik eingespart werden, jedoch ist die Zugänglichkeit der Wärmeübertragerfläche nur eingeschränkt möglich.

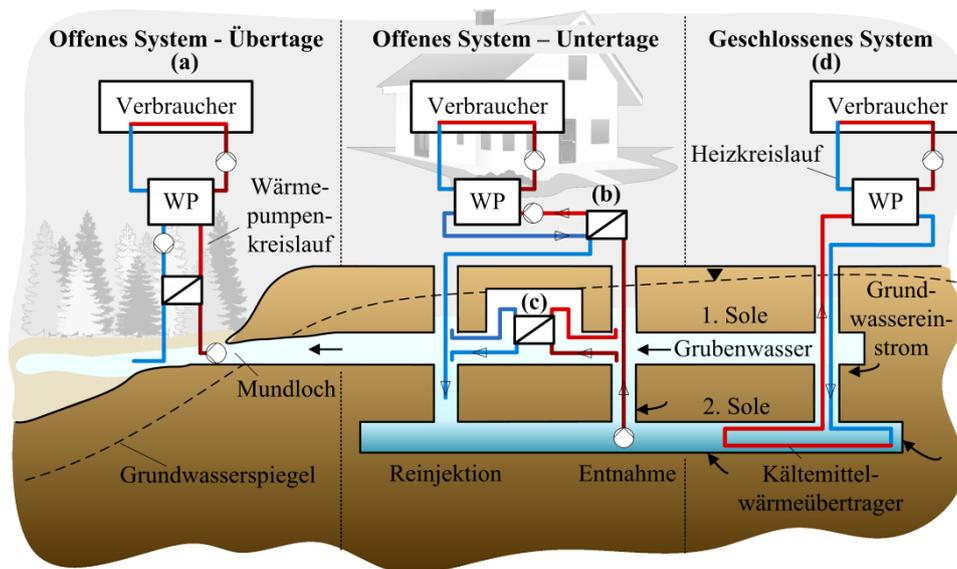


Abb. 1 Schematischer Aufbau einer Grubenwasseranlage mit unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten (offene und geschlossene Systeme). (Grab 2018)

Im Bergwerksrevier Freiberg gibt es bereits 3 unterschiedlich realisierte Grubenwassergeothermieanlagen die genutzt werden. Diese sind des Lehrbergwerks „Reiche Zeche, des Kreiskrankenhauses Freiberg und das Schloss Freudenstein. Weiterhin gibt es eine Speisung der Belüftungsanlage für das Kreiskrankenhaus Freiberg aus dem Bergwerksverbund Freiberg. Bei den Grubenwassergeothermieanlagen handelt es sich um Anlagen nach dem Schema b) und c) nach Abb. 1.

Aufgrund von gelösten und mitgeführten Mineralien kommt es zur Verschmutzung der Wärmeübertrager. Im Freiburger Revier basiert der Grubenwasserchemismus auf einem leicht mineralisierten Wasser mit den folgenden Parameter aus Tab. 1.

Tab. 1 Ausgewählte Wasserparameter von Grubenwässern im Freiburger Revier und Ehrenfriedersdorf

Parameter	Einheit	Rothschönberger	Schacht	Hauptstolln	Besucherbergwerk Ehrenfriedersdorf
		Stolln Freiberg	Reiche Zeche Freiberg	Umbruch Freiberg	
Wassertemperatur	°C	13,7	19,2	9,4	10,5
Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	1200-1800	300-370	108-200	
El. Leitfähigkeit	µS/cm	876,7	1545	827,1	607
pH-Wert	-	7,4	6,0	7,1	6,9
Chlorid	mg/l	61,8	91,9	86,46	25,5
Sulfat	mg/l	269	630	250,12	165
Arsen	µg/l	2,0	145	6,31	287
Eisen	µg/l	60	650	130	70
Cadmium	µg/l	21	40	39,8	<30
Kupfer	µg/l	8	10	20	<10

Parameter	Einheit	Rothschönberger Stolln Freiberg	Schacht Reiche Zeche Freiberg	Hauptstolln Umbruch Freiberg	Besucher bergwerk Ehrenfriedersdorf
Nickel	µg/l	29	30	40	20
Zink	µg/l	3571	7200	4947	640

Diese Werte sind für eine Prognose der Verschmutzung der Bergwerkswasser nur bedingt nützlich. Die Elemente können in gelöster Form oder als Partikel vorliegen. Durch eine Wasserprobennahme mit einem Filter kann diese Unterscheidung getroffen werden. Für die Wasserprobe in Ehrenfriedersdorf hat sich gezeigt das Al, Cu, Fe, Ni Mn, und Zn vorwiegend als ungelöste Partikel vorliegen. Dies ist optisch im klaren Wasser nicht zu erkennen. Diese Konzentrationen sind der Ausgangspunkt für die Untersuchung und die Bildung der Ablagerungen.

### 3. Mechanismen der Verschmutzung und Bildung der Ablagerungen

In Wärmeübertragern haben die Ablagerungen eine negative Auswirkung auf die Leistung der Gesamtanlage und müssen durch regelmäßige Wartungen entfernt werden. Die Bildung dieser kann im Bereich der Grubenwassergeothermie durch drei Mechanismen, die Kristallisation, das Partikel- und das Biofouling erfolgen.

Das Kristallisationsfouling basiert auf einer Ausfällung und Ablagerung von im Wasser gelösten Salzen auf der Werkstoffoberfläche. Eine Ursache dafür ist die Verschiebung der Löslichkeitsgrenzen bedingt durch eine Druck- bzw. Temperaturänderung. Diese lassen sich nur schwer vermeiden und sind bei der geothermischen Grubenwassernutzung unabdingbar.

Bei dem Partikelfouling werden bereits in Wasser vorhandene Schwebstoffe und Partikel organisch bzw. anorganischer Natur durch vorhanden Kräfte (Adhäsion, Gravitation, Diffusion, Trägheitseffekte oder Turbulenz) an die benetzte Oberfläche gebunden. Diese könnten durch geeignete Filter dem Wasser entzogen werden, jedoch ist dies aufwändig und wartungsintensiv.

Als Biofouling wird eine Ablagerung von schleimbildenden Bakterien an der Oberfläche bezeichnet, was zur Ausbildung eines Biofilms führt. Die so beeinflusste Oberfläche bietet zusätzlich einen größeren Angriffspunkt für die bereits genannten Foulingmechanismen. Dieser Verschmutzungsmechanismus kann nicht ausgeschlossen werden, da Mikroorganismen unter sämtlichen Bedingungen anzutreffen sind.

Bei der Bildung von Ablagerungen kommt es zu einem charakteristischen zeitlichen Verlauf. Zu Beginn der Verschmutzung ist eine Induktionszeit vorhanden, bei der keine nennenswerte Verschmutzung auftritt. In diesem Zeitraum werden auf der sauberen Oberfläche erste Nukleationskeime gebildet, bzw. erfolgt die erste Besiedlung mit Bakterien. Glatte Oberflächen und eine hohe Oberflächenenergie weisen eine besonders hohe Inkubationszeit auf. Anschließend wächst der Foulingwiderstand durch eine kontinuierliche Verschmutzung an. Dem gegenüber steht ein Abtragungsprozess durch auftretenden Scherkräfte bzw. Erosion der Strömung. Bei den meisten Anlagen kommt es zu einer asymptotischen Annäherung einer maximalen Verschmutzung. Das sich damit eingestellte Gleichgewicht ist mit einem Performanceverlust der Anlage im Bereich des Druckverlusts und des Wärmeübergangs verbunden. Somit ist die Anlage nicht mehr wirtschaftlich und effektiv zu betreiben, was eine Wartung und Reinigung der betroffenen Komponenten bzw. den Austausch ganzer Baugruppen notwendig macht. (Wilde 2019)

Die unterschiedlichen Mechanismen der Verunreinigung werden im Folgenden am Beispiel der Wärmeübertrageranlage in Ehrenfriedersdorf beschrieben und zeigen sich durch zwei prägende Erscheinungsformen. Es treten zum einen eine braune schleimige gleichverteilte Schicht auf, sowie harte schwarze ungleichverteilte Partikel und Anhaftungen auf. Die unterschiedlichen Ablagerungen sind in der Abb. 2 und sowie die Zusammensetzung in Abb. 3 im Vergleich zu einer unbenutzten Wärmeübertragerplatte dargestellt. In letzter ist zu sehen, dass der Hauptbestandteil der braunen Ablagerungen Eisen ist, welches als leicht kristallines Eisenhydroxid vorliegt. Weiterhin ist zu erkennen, dass ein konstanter Teil des Eisens als organisch gebundene Phase vorliegt. Die schwarzen Ablagerungen weisen einen wesentlich höheren Mangananteil auf, welche überwiegend als leicht reduzierbare Fraktion vorliegt.

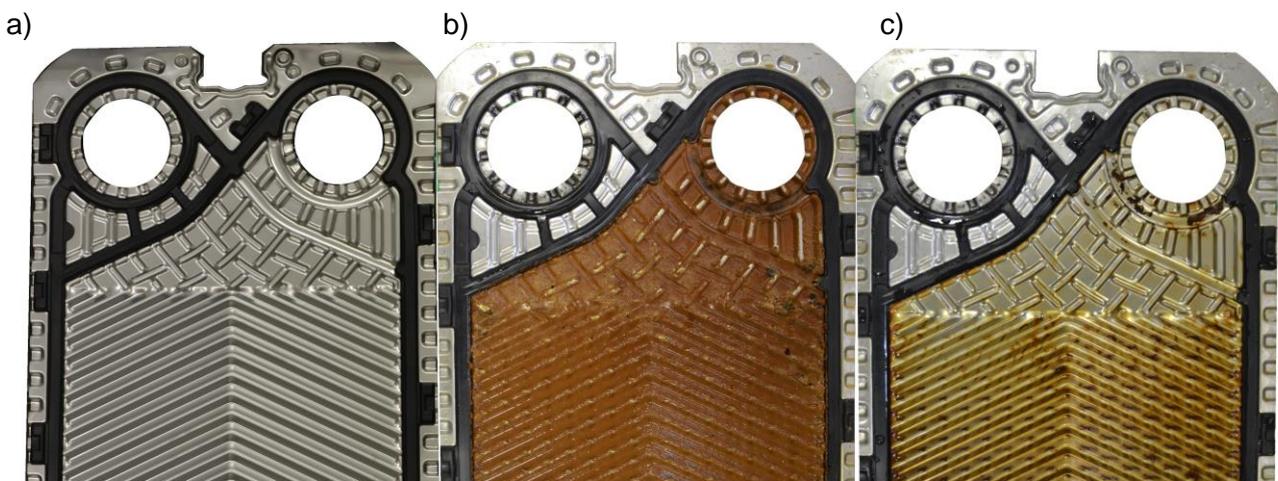


Abb. 2 Vergleich der Wärmeübertragerplatten der Grubenwassergeothermieanlage in Ehrenfriedersdorf a) vor dem Einsatz ohne Ablagerungen, b) verschmutzte Platten direkt nach dem Einsatz mit einem gleichmäßigen braunen Biofilm sowie einzelnen schwarzen Partikeln und c) verschmutzte Platte nach einer Reinigung mit einem Hochdruckreiniger mit schwarzen Ablagerungen.

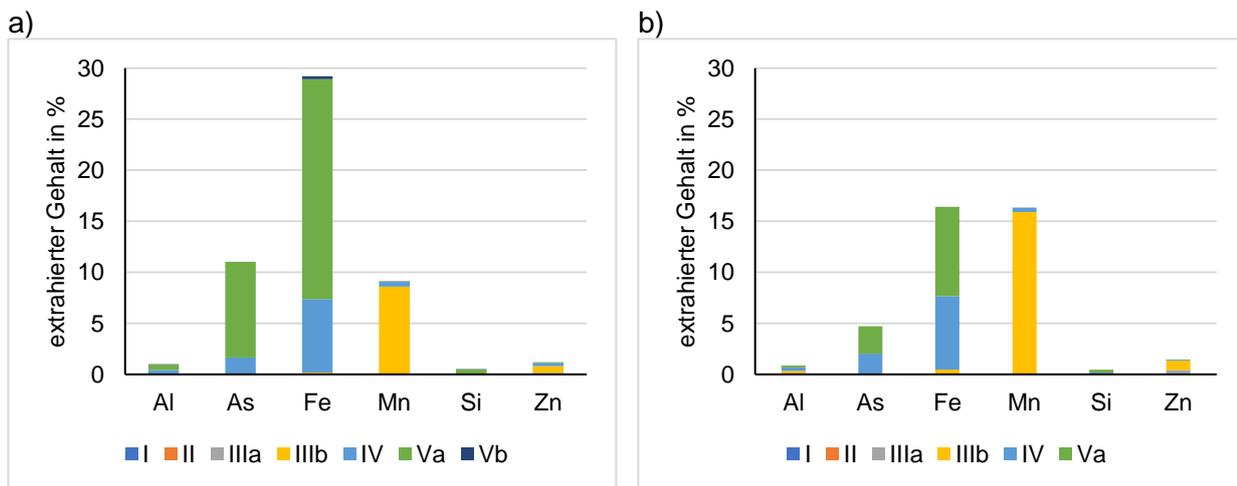


Abb. 3 Ergebnisse der sequentiellen Extraktion der Wärmeübertragerablagerungen in Ehrenfriedersdorf nach (Graupner und Kassahun et al. 2007) mit den einzelnen Löslichkeitsstufen für a) die braunen Ablagerungen sowie b) die schwarzen schwer zu entfernenden Ablagerungen, welche nach der Stufe Va vollständig aufgelöst waren

In der Abb. 2 ist zu sehen, dass ein Großteil der Ablagerungen auf den Wärmeübertragerplatten gleichverteilt und leicht durch mechanische Reinigung zu entfernen ist. Dabei handelt es sich um

lockere Eisenverbindungen. Weiterhin gibt es vermehrt schwarze Phasen und Partikel, vor allem im Einlaufbereich. Diese sind wesentlich härter und bilden eine kristalline Phase, welche nach der Reinigung verbleibt. Vor allem im Einlaufbereich der Wärmeübertragerplatte kommt es zu einer vermehrten Bildung der schwarzen erhöht manganhaltigen Ablagerungen. Der Unterschied der einzelnen Phasen lässt sich an einer REM-EDX-Aufnahme der genommenen Proben feststellen. Dabei wurde eine getrocknete Probe mit beiden Anteilen untersucht.

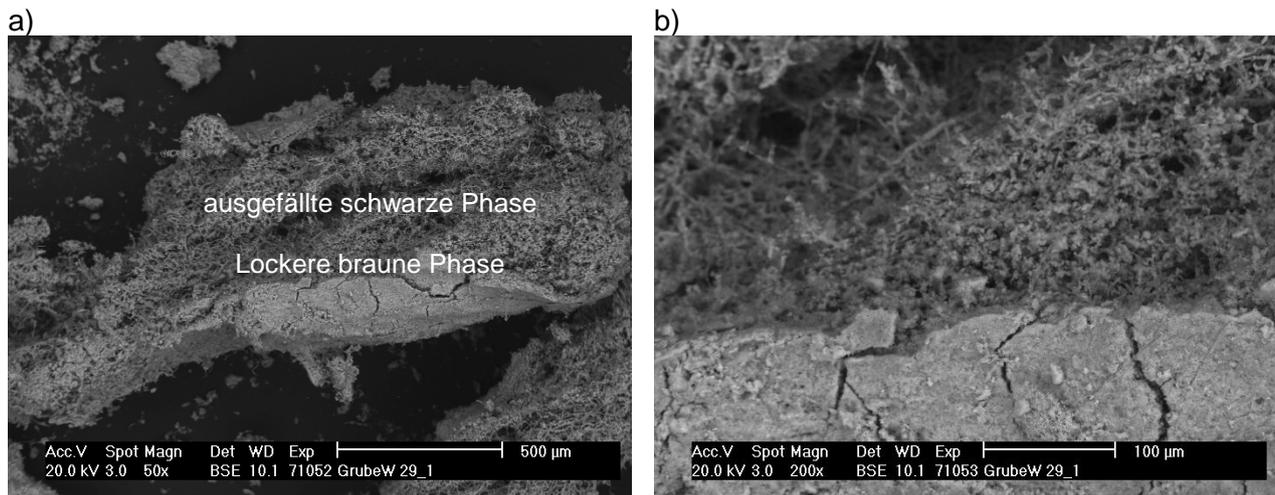


Abb. 4 REM-EDX-Aufnahme der getrockneten Proben mit den braunen und schwarzen Ablagerungen, wobei auf der Detailaufnahme b) unten der komprimierte lockere Anteil der Eisenphase, sowie der obere Bereich bestehend aus der ausgefällten Manganablagerung

Die Kenntnis des Bildungsmechanismus der Ablagerungen ist für eine Verhinderung dieser zwangsläufig notwendig. Wenn man die Wasserwerte vor und nach dem Wärmeübertrager vergleicht lässt sich darüber eine Aussage treffen. Durch den Einsatz von unterschiedlichen Filterstufen kann festgestellt werden, ob es sich um gelöste oder suspendierte Stoffe handelt. Bei den untersuchten Proben in Abb. 5 ist zu erkennen, dass ab einer Filterstufe von  $0,45\mu\text{m}$  ein Großteil der Aluminiumverbindung herausgefiltert werden kann. Dieser liegt als Partikel vor. Die auftretende Differenz der Konzentrationen zwischen Vor- und Rücklauf, lässt sich durch ein Auskristallisieren erklären. Das Gleiche tritt beim Mangan und Zink auf.

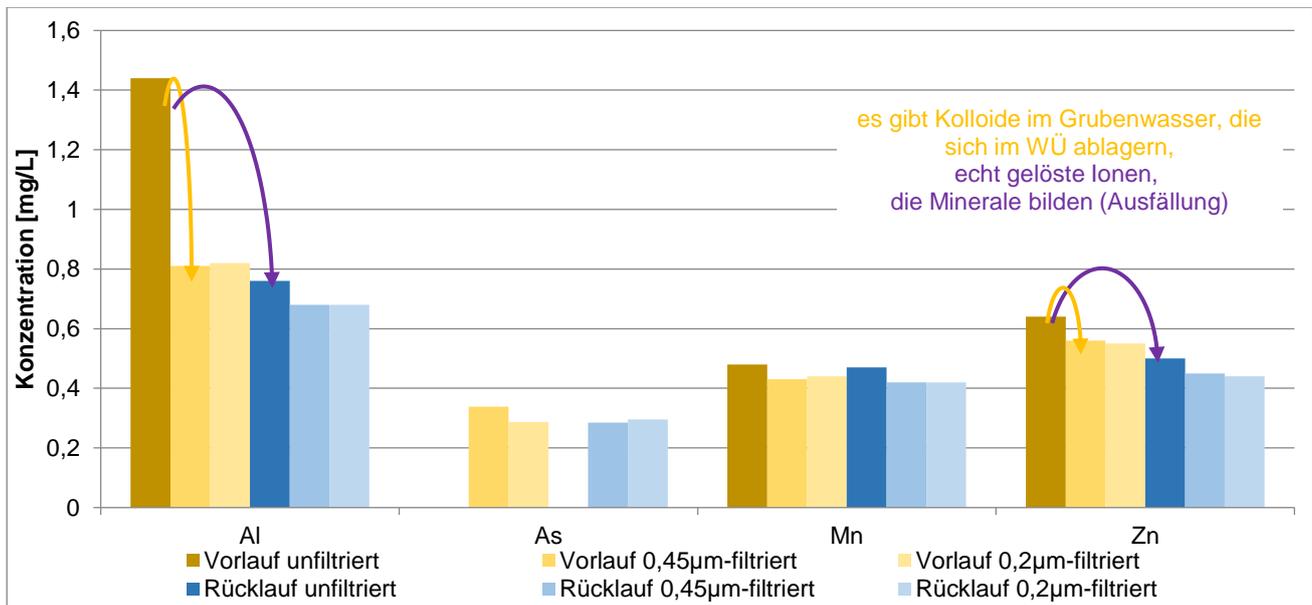


Abb. 5 Ergebnisse der Wasseranalyse des Wärmeübertrager in Ehrenfriedersdorf für den Vorlauf und den Rücklauf mit unterschiedlichen Filterstufen

Aufgrund der unterschiedlichen Erscheinungsform und Zusammensetzung der Ablagerung wird davon ausgegangen, dass sich die Bildungsmechanismen unterscheiden. Um das Biofouling nachzuweisen werden die Wasserproben mit einem Bakterientest auf eisenumsetzende und schleimbildende Bakterien mit BART-Tests untersucht. Durch diese kann die Belastung des Wassers mit den auftretenden Bakterien bestimmt werden und somit eine Prognose für die zu erwartende Verunreinigung getroffen werden. Diese Tests sind einfach zu handhaben und liefern innerhalb kurzer Zeit ein quantitatives Ergebnis. Somit kann die Standortwahl beschleunigt und mit aussagekräftigen Daten erstellt werden. Es hat sich gezeigt das sowohl eisenverwertende als auch schleimbildene Bakterien im moderaten Maße vorhanden sind. Somit ist das Biofouling eine Ursache für die Bildung von Ablagerungen. Weiterhin hat sich aufgrund der Zusammensetzung der Ablagerung gezeigt, dass die braunen eisenhaltigen Verbindungen teils organisch gebunden sind und teilweise als Partikel vorliegen. Somit wird als Bildungsursache für die Eisenphase das Partikelfouling angenommen. Für die Bildung der Phase mit dem erhöhten Mangengehalt hat sich das Kristallisationsfouling herausgestellt, da Mangan nicht als Partikel gebunden vorliegen und eine Differenz der Konzentrationen zwischen Vor- und Rücklauf auftritt.

#### 4. Aufbau eines mobilen geothermischen Versuchsstandes

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben ist eine zuverlässige Prognose der Verschmutzung im Wärmeübertrager von vielen Parametern, wie den Wasserwerten, Betriebsparametern oder Mikroorganismen abhängig. Somit ist eine experimentelle Untersuchung im Labor nur wenig aussagekräftig um den Gesamtprozess der Wärmeübertragerverschmutzung zu verstehen. Da bereits Grubenwassergeothermieanlagen in Betrieb sind, ist eine Kooperation mit den Betreibern zur Untersuchung an bestehenden Anlagen eine Methode um reale Ergebnisse zu erzielen. Dies gestaltet sich schwierig, da die Anlagen nicht für ein intensives Monitoring ausgerüstet sind und für den Anlagenbetreiber eine regelmäßige Untersuchung der Wärmeübertrager mit erhöhten Aufwand verbunden ist. Für den Betrieb der Anlagen ist der Wärmebedarf die regelnde Größe. Somit stehen die Anlagen zu Teilen des Jahres still oder sind nur im Teillastbetrieb eingesetzt. Dies verlängert die Zeiten der Verschmutzung und bedeutet eine zusätzliche Verzögerung.

Aufgrund dieser Ursachen ist eine unabhängige Untersuchung von potentiellen Grubenwasserstandorten unter realen Bedingungen nur durch einen eigens dafür entwickelten Versuchsstand möglich. Mit diesem soll eine repräsentative Beprobung des Wasser und der Ablagerungen sowie dem Test unterschiedlicher Materialien und Beschichtungen ermöglicht werden.

Somit haben sich für die Konstruktion des Versuchsstands folgende Anforderungen ergeben:

- Mobiler Einsatz der Anlage mit Zugang zum Bergwerk und einfachen Anschlussbedingungen
- Messung der Verschmutzung des Wärmeübertragers und der Anlagenparameter zur Untersuchung der Verschmutzung und dem Wirkungsgrad der Anlage
- Einfacher Zugang zu den Wärmeübertragern mit der Möglichkeit der Demontage und der Probenahme von Wasser und Ablagerungen
- Einsatz von korrosionsfesten Materialien bei allen Grubenwasser berührenden Teilen
- Schutz der Anlagenkomponenten gegen äußere Einflüsse (Feuchtigkeit, Blitzschutz, Überspannung, ...)
- Aufnahme und Speicherung der Messwerte über den Messzeitraum, sowie umgebungsunabhängige Übertragung der Daten

Aufgrund dieser Anforderungen ist der Versuchsstand entworfen und gebaut worden. Der Versuchsstand benötigt lediglich einen 230V Anschluss und kann damit autonom mit der Möglichkeit eines Fernzugriffs betrieben werden. Der Versuchsstand basiert auf einer Wärmepumpenanlage mit dem dargestellten Fließschema in Abb. 6. Dabei wird ein offenes System nach Abb. 1.b verwendet. Dieses verfügt über einen Kältemittelkreislauf, zwei Zwischenübertragerkreisläufe und einen Grubenwasserkreislauf. Aufgrund der im Freiburger vorherrschenden Parameter wurden die Auslegungsparameter mit 12 °C Grubenwassertemperatur verwendet.

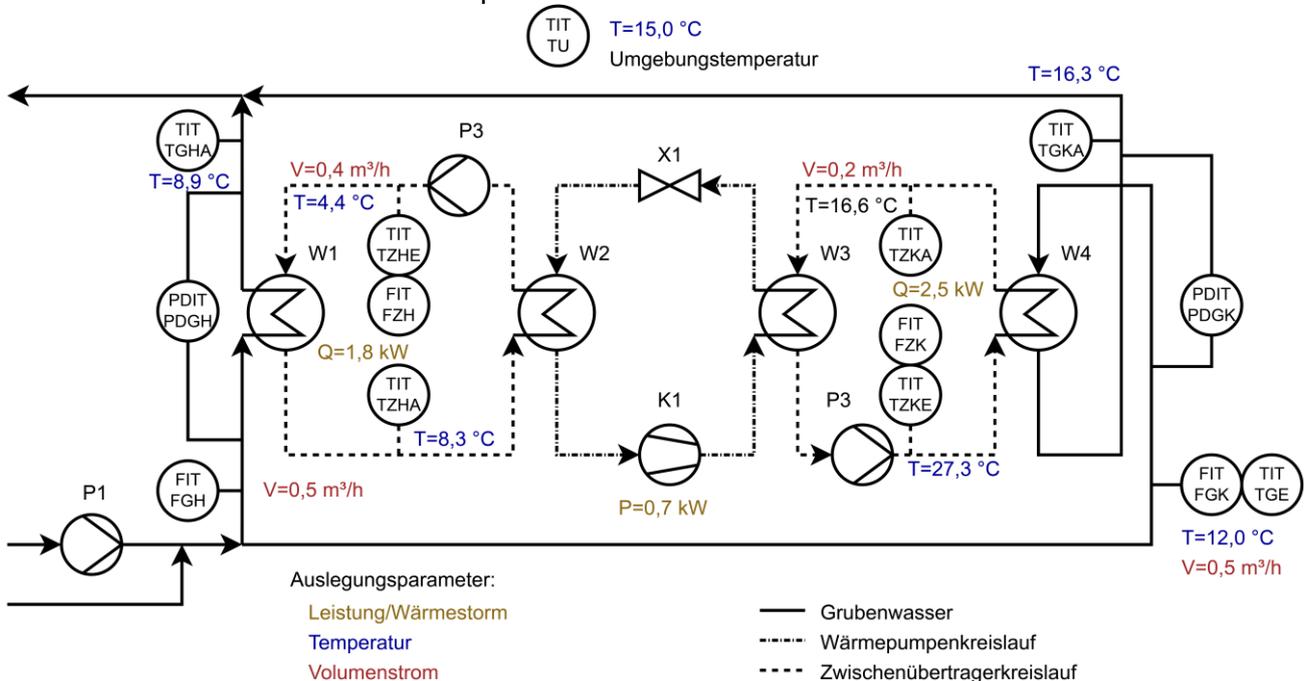


Abb. 6 Schema der Grubenwassergeothermieanlagen zur Untersuchung der Wärmeübertragerverschmutzung mit der Angabe der Auslegungsparameter von Temperatur T, Volumenstrom V, sowie Wärmeströme Q und Leistung P

Die Verwendung der Zwischenübertragerkreisläufe erhöht den Aufwand, bietet jedoch die Möglichkeit des direkten Zugriffes auf die Wärmeübertrager. Nur so ist es möglich mit geringem Aufwand

die Ablagerungen und Mechanismen der Verschmutzung zu untersuchen. Die Anlage verfügt über 3 grubenwasserentnahmestellen. Somit können direkt vor bzw. nach dem Wärmeübertrager die Wasserparameter und –zusammensetzung untersucht werden. Durch die Verwendung von Plattenwärmeübertragern wird die schnelle Zugänglichkeit und ein großes Flächen zu Leistungsverhältnis erreicht. Somit kann die Anlage kompakt gebaut werden, was einen Einsatz im Grubengebäude ermöglicht. Weiterhin lassen sich durch einen Austausch der Wärmeübertragerplatten unterschiedliche Materialien und Beschichtungen während eines Testlaufs untersuchen.

Der Aufbau des Versuchstandes hat 4 Hauptkomponenten, die Wärmepumpe, Grubenwasserpumpe, die Wärmeübertrager sowie die Sensoren. Diese sind in der Abb. 7 im 3D-Modell sowie dem Versuchsstand markiert. Gemessen wird bei der Anlage der Volumenstrom, der Druckverlust über den Wärmeübertrager, sowie die Temperaturen aller Fluide. Somit kann eine Bilanzierung der Wärmeverluste durch die zeitabhängige Verschmutzung der Wärmeübertrager erfolgen. In der Anlage wird das Grubenwasser durch die Grubenwasserpumpe angesaugt und der Volumenstrom wird aufgeteilt. Somit kann ein Heizen und Kühlen mit einer Anlage realisiert und auf je einem Wärmeübertrager die Ablagerungen der einzelnen Betriebsfälle bzw. Jahreszeiten untersucht werden.

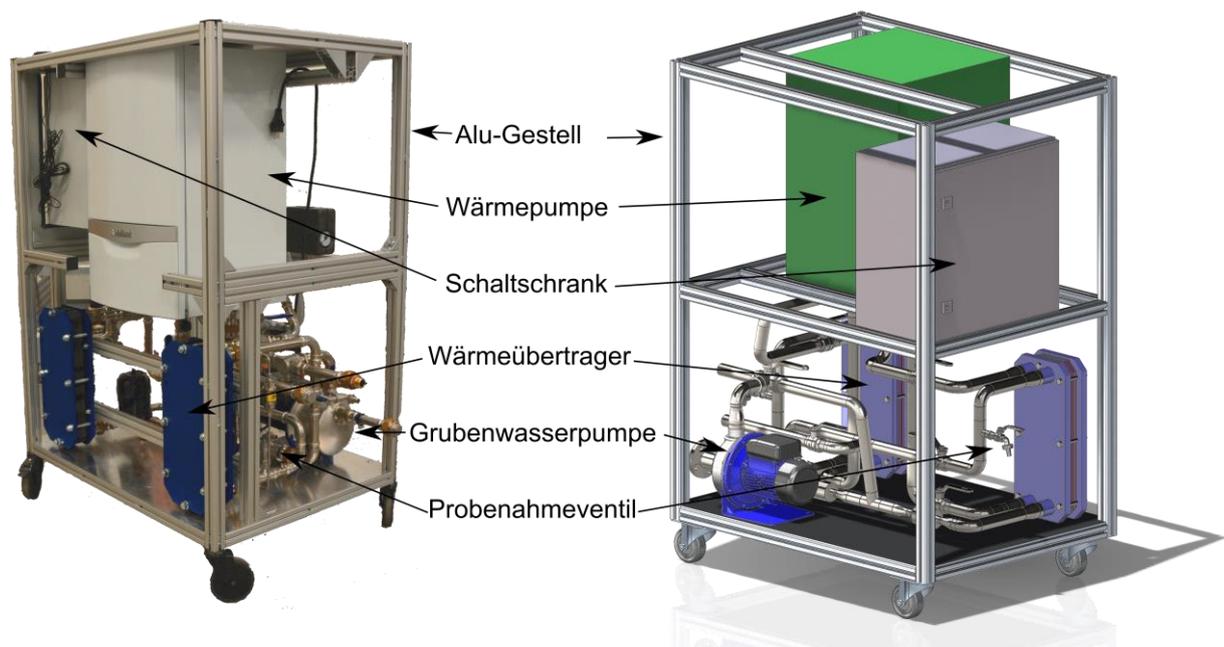


Abb. 7 3D-Modell sowie Abbildung der realen Versuchsanlage zur Untersuchung der Wärmeübertragerverschmutzung bei der geothermischen Grubenwassernutzung mit einer Beschriftung der wichtigsten Komponenten

Für die weitere Projektlaufzeit lassen sich unterschiedliche Beschichtungen und Plattenmaterialien testen. Aktuell sind 8 unterschiedliche Plattenpaare verbaut. Dabei handelt es sich um verschiedene Edelstähle, Titan, Nickelbasislegierungen und eine antibakterielle Beschichtung. Somit kann für unterschiedliche Standorte und Grubenwasserchemismen das Verschmutzungsverhalten untersucht werden. Das oberflächen- und materialabhängige Foulingverhalten soll in Zusammenhang mit verschiedenen Oberflächenkennwerten gebracht werden (z.B. Kontaktwinkel, Oberflächenenergie) die im Vorfeld der Versuche gemessen werden.

## 5. Ergebnisse der Untersuchungen des Versuchsstands und der Ursache der Ablagerungsbildung

Im Rahmen der Untersuchung des Projekts Vodamin II soll die Ursache für die Verschmutzung in den Wärmeübertragern ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden Strömungssimulationen im Bereich der Wärmeübertragerplatten und der Gesamtanlage durchgeführt, um einen Zusammenhang zwischen den Strömungsparametern und den Ablagerungen zu ermitteln. Dazu wird eine numerische Simulation auf Basis der Plattengeometrie durchgeführt. Diese ist in der Abb. 8 dargestellt. Bei der Untersuchung der Feststoffproben hat sich gezeigt, dass ein symmetrisches Ablagerungsmuster auftritt. Dieses konnte mit der Simulation erzeugt werden, um die auftretenden Geschwindigkeiten und Wirbelstärken zu vergleichen.

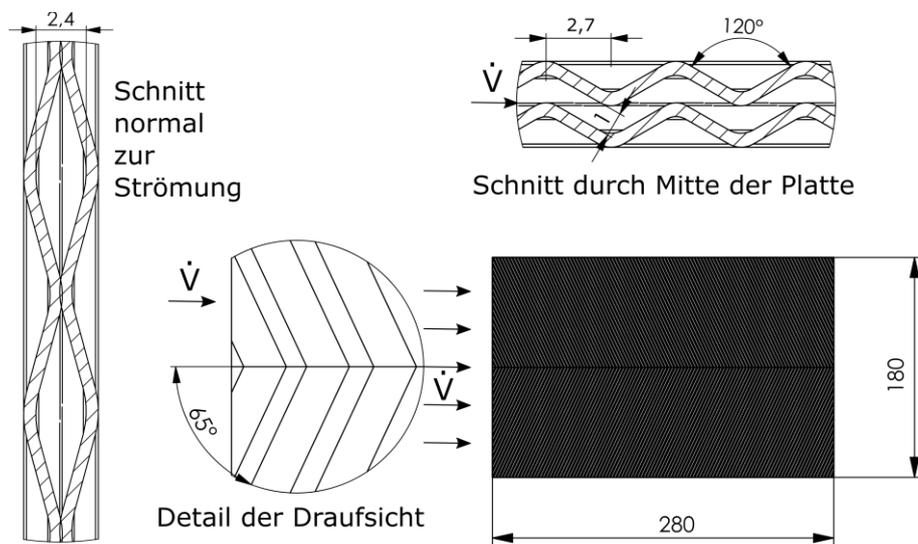


Abb. 8 Berechnungsgebiet für die Numerische Simulation der Wärmeübertragerplatten und Beschreibung der Plattengeometrie in mm

Die Berechnung erfolgt mit der Konstruktionssoftware SolidWorks und dient der Verdeutlichung von Strömungsabläufen und Änderungsbereichen. Eine quantitative Zuordnung und Bestimmung der Parameter ist nicht Ziel der Untersuchung. Ausgewertet wird dabei das letzte Drittel der durchströmten Platte, da es zu Beginn zur Einlaufprozessen und Abweichungen kommen kann. Die Maße der Berechnungsgeometrie basieren auf den real eingesetzten Wärmeübertragerplatten.

Für die Berechnung wird eine laminar bzw. turbulente stationäre Strömung mit Wasser an einer strukturierten Wand betrachtet. Der Eingangsvolumenstrom von  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  je Platte ergibt sich aus den realen Anlagenparametern. Der Wärmeübergang wird nicht berücksichtigt und hat somit keinen Einfluss. Dieser kann bei der Betrachtung der Strömungsverhältnisse vernachlässigt werden. Bei dem Partikelfouling spielt der Temperatureinfluss keine Rolle. Die auftretenden wandnahen Geschwindigkeiten zeigen, dass es Totwassergebiete gibt, in denen eine Ablagerung zu erwarten ist. Weiterhin treten vermehrt Scherspannungsunterschiede auf, wodurch ein erhöhter Abtrag der Foulingsschicht zu erwarten ist. Dieser ist in der Abb. 9 zu erkennen. Weiterhin sieht man das im Bereich der Anströmung und des Staupunktes zwischen den einzelnen Platten ein besonders hohes Potential zur Ablagerung besteht.

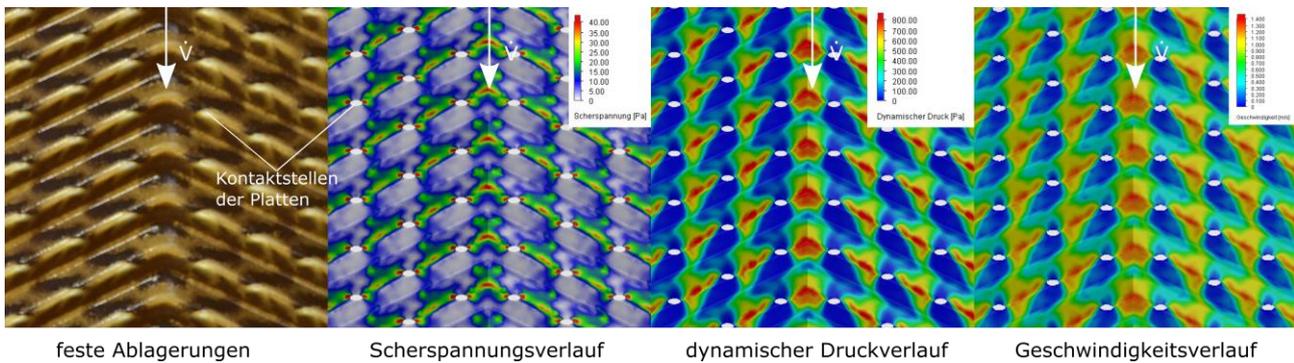


Abb. 9 Vergleich der nach dem Reinigen mit einem Hochdruckreiniger verbliebenen Ablagerungen mit den Strömungsparametern Scherspannung, dynamischer Druck und der Geschwindigkeit auf einer Wärmeübertragerplatte

Um den Einlaufbereich zu untersuchen, wurde vereinfacht ein Vergleich zwischen den Strömungsprofilen zwischen der ersten und der letzten Platte des Versuchsstandes simuliert. Diese Simulation basiert auf der Geometrie des Versuchsstandes sowie den für die Auslegung verwendeten Volumenströmen mit einer vereinfachten Plattengeometrie. Diese unterschieden sich von den Werten der für die reale Plattengeometrie. In Abb. 10 zeigt sich, dass vor allem um den Einströmbereich eine starke Änderung der Geschwindigkeit auftritt. Dies deckt sich mit der Position der auftretenden Ablagerungen aus Kapitel 4. Über den Rest der Wärmeübertragerplatten ist ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil entlang der Stromlinie zu erkennen. Somit lässt sich die angenommene Vereinfachung für die Berechnung der einzelnen Wärmeübertragerplatten bestätigen.

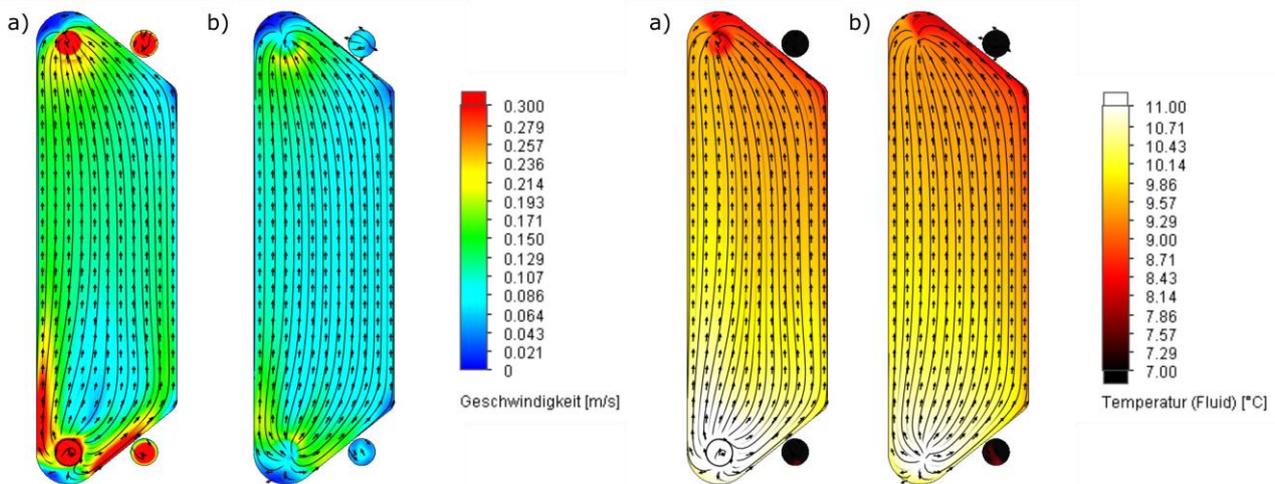


Abb. 10 Temperatur und Geschwindigkeitsverlauf a) Einströmplatte und b) der letzten Platte des Wärmeübertragers mittig im Wärmeübertragerkanal mit einer vereinfachten Plattengeometrie ohne Strukturierung

Der Vergleich der auftretenden Ablagerungen bestätigt die drei genannten Verschmutzungsmechanismen. Wie in Kapitel 3 beschrieben ist das Partikelfouling, in Kombination mit dem Biofouling zu beobachten. Dabei können die braunen eisenhaltigen Ablagerungen auf einen bakterieninduzierten Anlagerungsprozess zurückgeführt werden. Durch eine Variation der Strömungsgeschwindigkeit bzw. das Spülen mit Druckluft lassen sich dies beseitigen. Das Kristallisationsfouling wird als Ursache für die Bildung der schwarzen kristallinen Ablagerungen, welche durch eine Verschiebung der Löslichkeitsgrenze erfolgt. Diese Ablagerungen lassen sich nur Chemisch entfernen.

Für die weitere Untersuchung soll die Verknüpfung des Wärmeübergangs bei der numerischen Lösung der realen Plattengeometrie berücksichtigt werden, um den lokale Temperaturgradienten zu

ermitteln. Weiterhin sollen die eingesetzten unterschiedlichen Plattenmaterialien und Beschichtung erweitert werden und bei verschiedenen Grubenwasserchemismen untersucht werden.

## Quellenangaben

- Beck, H. P., Schmidt, M.: Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Abschlussbericht: BMU FKZ 0325074. Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal (2011)
- Bracke, R., Bussmann, G.: Heat-Storage in deep hard coal mining infrastructures. Paper-ID: 38002. In: International Geothermal Association IGA (Hrsg.) Proc. of World Geothermal Congress (2015). Melbourne/Australia, 19–24. April
- Eikmeier, B., Wagner, H. J.: Seasonal Storage of Solar Heat in Underground Mines. In: ISES (Hrsg.): Proc. of Solar World Congress. Adelaide, Australia, 25–30 Nov., S. 1849–1854 (2001)
- Gahlen, K.: Variationen zur geothermischen Nutzung der Infrastruktur von Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen. In: *Der Geothermiekongress 2009. Bochum, 17.–19. Nov.* Bundesverband Geothermie (2009)
- Galinsky, G., Leistner, J., Scheuermann, G.: Kavernenkraftwerk Drei-Brüder-Schacht. Geschichte und Überlegungen zur Rekonstruktion, 2. Aufl. Saxonia, Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg (2001)
- Grab T., Storch T., Groß U: Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken. In: Bauer M., Freedon W., Jacobi H., Neu T. (Hrsg.) Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Springer Spektrum, Berlin. (2018) S. 523–586
- Grab, T, Energiequelle Grubenwasser- Energetische Nutzung, *Website*, (2019) <https://geothermie.iwtt.tu-freiberg.de/energetische-nutzung.html>
- Graupner T., Kassahun A., Rammlmair D., Meima J. A., Kock D., Furche M., Fiege A., Schippers A., Melcher F. Formation of sequences of cemented layers and hardpans within sulfide-bearing mine tailings (mine district Freiberg, Germany), p. 2486-2508, *Appl. Geochem.*, 22 (2007).
- Huber, G.: Energetische Nutzung von Grubenwässern. *Dissertation*. TU Bergakademie, Freiberg (1990)
- Jensen, E. B.: Mine Water Used to Heat Ventilation air at Henderson Molybdenum Mine. *Mining Engineering*. 35(1), 17–20 (1983)
- Jessop, A. M., MacDonald, J. K., Spence, H.: Clean Energy from Abandoned Mines at Springhill, Nova Scotia. *Energy Sources*. 17(1), 93–106 (1995). <http://doi.org/10.1080/00908319508946072>
- Niemann, A.: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Anlagen des Steinkohlenbergbaus als Pumpspeicherverke. 2. Int. Arbeitsgespräch Geothermie und Grundwasser. Essen. <https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasserbau/30-11-niemann.pdf> (2012). Zugegriffen: Okt. 2019
- Preene, M., Younger, P. L.: Review or critical Assessment. Can you take the heat? – Geothermal energy in mining. *Mining Technology*. 123(2), 107–118 (2014). <http://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>
- Ramos, E. P., Falcone, G.: Recovery of the geothermal energy stored in abandoned mines. In: Hou, M. Z., Xie, H., Were, P. (Hrsg.) *Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion*. Proc. of the 3rd Sino-German Conf. Underground Storage of CO2 and Energy", Goslar, Germany, 21-23 May 2013. Springer, Berlin (2013)
- Schaberg, A.: Nutzung von gefluteten Grubenräumen zur Langzeit-Wärmespeicherung. Meßtechnische und numerische Untersuchung. *Dissertation*. TU Bergakademie Freiberg (1998)
- Wilde, L.: Untersuchung zum Fouling in Wärmeübertragern bei der geothermischen Grubenwassernutzung, *Masterarbeit*, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg (2019).

TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für technische Thermodynamik, Gustav Zeuner Straße 7, 09599 Freiberg  
Sebastian.Pose@ttd.tu-freiberg.de