

Geochemisches Monitoring des geothermalen Tiefenspeichers in Neubrandenburg

Markus Wolfgramm, Andrea Seibt

Zusammenfassung

Langzeit-Speicher für Wärme und Kälte dienen der Minimierung des Primärenergieeinsatzes, der durch das jahreszeitliche Auseinanderklaffen von Energieangebot und Energienachfrage verursacht wird.

So wird in Neubrandenburg der sommerliche Wärmeüberschuss des Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerkes (GuD) genutzt, um im Winter die Warmwasserversorgung des Netzes "Rostocker Straße" zu sichern. Dazu wird die Wärme mit einer Temperatur von 80°C und einer Rate von 100 m³/h in den geothermalen Aquifer geleitet, und im Winter erfolgt die Rückförderung dieser Wässer mit Temperaturen von 65 – 78°C zu Heizzwecken.

Als geothermale Aquiferspeicher dienen die am Standort in 1250 m Tiefe befindlichen Postera-Sandsteine. Die Lagerstättentemperatur des salinaren Tiefenfluides (130 g/L) beträgt 53 - 55°C. In Folge des Speicherbetriebes wird der Aquifer von 53 auf 80°C erwärmt.

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projektes sollen im Teilprojekt „Geochemisches Monitoring“ mögliche geochemisch stattfindende Prozesse nachgewiesen werden, um Schädigungen des Speichers abzuwenden. In Abhängigkeit des Fahregimes werden regelmäßig Wasserproben analysiert. Daneben werden auch spezielle mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt. Eine gute Widerspiegelung ablaufender Reaktionen im Thermalwasserkreislauf geben die Filterinhaltsstoffe, welche mittels mikroskopischer Methoden erfasst werden.

Erste Analysen lassen erkennen, dass bei Temperaturerhöhung sich zwar die Konzentrationen der Hauptionen nicht ändern, jedoch sich gewisse Tendenzen bei den Spurenelementen wie Kupfer, Zink und Blei ergeben. Mögliche Ursache dafür könnten Lösungserscheinungen von Tonmineralen sein. Neben der weiteren Kontrolle der Wässer werden momentan Lösungsversuche von Bohrkernproben unter relevanten Bedingungen bei Temperaturen bis 100°C durchgeführt, um die Auflösung von Tonmineralen als SiO₂-Quelle im Aquifer intensiver zu untersuchen.

Anhand dieser Versuche und geochemischer Modellrechnungen soll die Möglichkeit geprüft werden, die Einspeichertemperatur der Wässer weiter anzuheben, ohne den Aquiferspeicher nachhaltig zu schädigen.

1 Einleitung

Seit 2004 wird in Neubrandenburg ein geothermischer Tiefenspeicher betrieben (KABUS et al. 2004), wie er weltweit einmalig ist. In den ca. 1250 m warmen tiefen Postera-Sandstein wird dazu im Sommer Überschusswärme eines GuD-Kraftwerkes (ca. 80°C) eingelagert. Dazu wird originär ca. 54 °C warmes Wasser aus der Bohrung Gt N4/86 gefördert und auf 80 °C erwärmt in die Gt N1 injiziert. Im Winter wird der Prozess umgekehrt (KABUS et al. 2004). Aufgrund der Einmaligkeit dieser Anwendung gibt es kaum verwertbare Daten, insbesondere keine, welche Rückschlüsse auf geochemische Auswirkungengeben würden. Aus diesem Grund wurde ein entsprechendes Forschungsprojekt initiiert, welches durch das BMWi gefördert wird.

Die begleitenden geochemischen Untersuchungen zum Wärmespeicherprozess Neubrandenburg verfolgen drei Ziele:

- 1.) Identifizierung von Änderungen im Thermalwasserchemismus und im Speicher anhand eines geochemischen Monitorings,
- 2.) geprüft werden soll, ob Injektionstemperaturen > 80 °C möglich sind, da betriebsseitig aus dem GUD-Kraftwerk solche Temperaturen vorhanden sind und dadurch die Wirtschaftlichkeit erhöht würde,
- 3.) Optimierung der Betriebsparameter (u.a. Einspeichertemperatur, Filtration).

Das geochemische Monitoring beinhaltet:

- a) die regelmäßige Erfassung von Redoxpotenzial, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperatur und Analyse sensibler reagierender Parameter
- b) Wasservollanalysen,
- c) Modellierung der IST- und SOLL-Zustände
- d) Feststoffuntersuchungen aus Filtraten (REM)
- e) sporadische Kontrolle der mikrobiologischen Aktivität

Erste Ergebnisse des geochemischen Monitorings werden im Artikel diskutiert.

Die Untersuchungen zur Anhebung der Einspeichertemperatur, die nicht Gegenstand dieses Artikels sind, setzen sich aus folgenden Arbeiten zusammen:

- a) geochemische Modellierung entsprechender Sättigungsindexsensibler Parameter
- b) Durchführung von Laborversuchen

Eine Optimierung der Betriebsparameter ergibt sich im Ergebnis aller oben genannten Untersuchungen.

2 Geothermischer Tiefenspeicher Neubrandenburg

2.1 Historie und Betrieb des Tiefenspeichers Neubrandenburg

Im Jahre 1985/1986 wurden in Neubrandenburg vier Geothermiebohrungen Gt N1 – Gt N4 abgeteuft, je eine Injektions- und Förderbohrung in den Hettang-Sandstein und je eine in die Oberen Postera-Sandsteine.

1989 ging die geothermische Heizentrale (GHZ) mit den Injektionsbohrungen Gt N3/86 (Oberer Postera-Sandstein) und Gt N4/86 (Hettang-Sandstein) und den Förderbohrungen Gt N1/86 (Postera-Sandstein) in Betrieb. Gt N2/85 wurde aufgrund technischer Probleme nach einer kurzzeitigen Inbetriebnahme aufgegeben. Mit Unterbrechungen wurden bis 2001 die Oberen Postera-Sandsteine als geothermischer Förderhorizont genutzt. Dabei wurden ca. 75 m³/h Wasser umgewälzt. Zwei weitere in Neubrandenburg existierende Bohrungen (Gt N5/88, Gt N6/88), welche eine den Hettang- und die andere die Oberen Postera-Sandsteine erschließen, werden nicht genutzt, sind aber als Beobachtungsbohrungen zugänglich.

Ab 2001 erfolgte der Umbau der GHZ zu einem geothermischen Wärmespeicher. Dazu wurde die Bohrung Gt N4/86 100 m auf die Teufe der Gt N 3/86 bis in die Oberen Postera-Sandsteine vertieft. Somit wurde der gleiche geologische Horizont aufgeschlossen, in dem seit 1989 das abgekühlte Thermalwasser aus der Förderbohrung Gt N 1/86 injiziert wurde. Beide Bohrungen sind obertage ca. 5 m und untertage im Bereich des Sandsteins nur ca. 1-2 m

entfernt. Die Bohrung Gt N3/86 wurde bis zum Aalen-Sandstein verfüllt und dort perforiert um sie einer balneologischen Nutzung zuzuführen.

Die Sondenkopfinstallation der Gt N1/86 und Gt N4/86 sind aus GFK ausgeführt. Neu ist auch, dass an allen Bohrungen ein Stickstoffbeaufschlagungssystem integriert wurde (KABUS et al. 2004). Im Sommer 2004 wurde der Wärmespeicher in Betrieb genommen. Der Wärmespeicher funktioniert so, dass im Sommer aus der kalten Bohrung Gt N4/86 Schichtwasser gefördert wird. Obertägig wird es über Wärmetauscher mit der Überschusswärme des GuD erwärmt und in die Gt N1/86 (warme Seite) injiziert. Im Winter wird die Richtung umgekehrt und das rückgeförderte warme Wasser aus der Gt N1/86 wieder über Wärmetauscher abgekühlt. Die gewonnene Wärme wird dem Fernwärmenetz zugeführt (KABUS et al. 2004).

2.2 Geologie und Lithologie des Rhätaquifers in Neubrandenburg

Neubrandenburg befindet sich geologisch gesehen im zentralen Bereich des Norddeutschen Beckens (WOLFGRAMM et al. 2005, SEIBT et al. 2006). Durch die zwei genutzten Wärmespeicherbohrungen Gt N1/86 und Gt N4/86 werden dabei die Sandsteine der Oberen Posters-Schichten (Rhätkeuper) in einer Tiefe von 1230 – 1270 m. u. GOK aufgeschlossen. Diese ca. 20 m mächtigen Sandsteine enthalten Tiefenwässer mit einer Salinität von 130 g/l bei Temperaturen von ursprünglich 54 °C. Bei den Sandsteinen des Rhäts (Oberer Posters-Schichten) in Neubrandenburg handelt es sich um fluviatile bis fluviolakustrine, flachmarine-deltatische Bildungen, welche nach BEUTLER & NITSCH (2005) der sogenannten nordischen Fazies zugeordnet werden. Diese lagern auf den Tonsteinen und Karbonatmergeln der sogenannten Steinmergelkeuperfazies (Ton-Karbonat-Playa) auf. Die Sandsteine des Hettang-Rhät im Nordostdeutschen Becken sind überwiegend feldspat- und gesteinsbruchstückführende mat-xarme Quarzsandsteine (SCHOLLE 1992).

3. Geochemisches Monitoring

Besonderer Augenmerk wird bei dem Monitoring auf das SiO₂-System und die Schwermetallionen-Konzentrationen im Fluid gelegt. Dabei müssen Lösungs- und Fällungsreaktionen in Betracht gezogen werden. Neben der Kontrolle der gelösten Ionenkonzentrationen geben die Filterinhaltsstoffe Hinweise auf stattfindende Feststoffbildungen im zirkulierenden Fluid sowie auf Korrosionsprozesse an Anlagenteilen. Da kultivierbare Mikroorganismen im Thermalwasser von Neubrandenburg seit der Inbetriebnahme der geothermischen Heizzentrale 1989 nachgewiesen wurden (KÖHLER et al. 1997, 1997a), sind bakteriologische Erhebungen ebenso Bestandteil des Monitorings.

3.1 Analytik der Tiefenwässer

3.1.1 Hydrogeochemische Eigenschaften

Die Wässer im Nordostdeutschen Becken waren Gegenstand einer Reihe von Untersuchungen (u.a. LEHMANN 1974a,b, HOTH et al. 1997, NAUMANN 2000, WOLFGRAMM et al. 2002, SEIBT et al. 2006). Entsprechend des prinzipiellen Salinitätstrends von 10 g/l je 100 Tiefe weisen die Tiefenwässer am Standort Neubrandenburg im Rhätaquifer einen TDS (Total Dissolved Solid) von 130 g/l auf.

Seit der Inbetriebnahme der Geothermischen Heizzentrale 1989 wurde das Tiefenwasser mehrfach untersucht (KÜHN 1997, HOTH et al. 1997, NAUMANN 2000). Hauptkation ist Natrium. Bei den Anionen dominiert Chlorid. Somit ist das Formationsfluid dem Na-Cl-Typ zuzuordnen. Calcium und Strontium weisen um eine Größenordnung geringere Gehalte auf, alle anderen gelösten Bestandteile sind um zwei oder mehr Größenordnungen geringer konzentriert. Das

Thermalwasser enthält ca. 15 mg/l gelöste Eisen-Ionen. Ammonium erreicht zumeist Werte bis 25 mg/l.

Sulfat liegt um 1.000 mg/l, HS^- bzw. S^{2-} war in den letzten Analysen nicht nachweisbar. Der Gehalt an gelöster Kieselsäure (SiO_2) liegt mit 8 bis 14 mg/l vergleichsweise niedrig. Das Formationsfluid ist leicht sauer ($\text{pH}=6,0$). Der Gasgehalt beträgt nur 3-4 Vol.-% und setzt sich zu ca. 58 Vol.-% aus Kohlendioxid und zu ca. 42 Vol.-% aus Stickstoff zusammen. In Spurengasen sind Methan, Helium, Wasserstoff, Argon und Ethan (NAUMANN 2000).

3.1.2 Monitoring Fluid

Seit der Inbetriebnahme sind zwei vollständige Zyklen „Einspeichern-Ausspeichern“ durchlaufen worden, wobei bislang ein Zyklus geochemisch verfolgt werden konnte. Das Einspeichern von ca. 80°C heißem Fluid (2. Zyklus) erfolgte bis Ende November 2005. Danach wurde ca. 4 Monate die Wärme zurückgewonnen. Der 3. Zyklus begann Ende März 2006 und lief ca. 1 Monat bis aufgrund technischer Probleme die Anlage ca. Monate außer Betrieb genommen werden musste.

In ca. monatlichem Abstand wurden pH-, Eh-Wert, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperatur in einer Durchflusszelle gemessen. Die G-Spezies (HCO_3^- und/oder CO_3^{2-}) wurden mittels alkalimetrische und acidimetrische Titration bestimmt. Anhand photometrischer Methoden wurde der Gehalt an Eisen, Mangan, Ammonium und Silicium ermittelt. Vollanalysen wurden bislang 5 ausgewertet.

Insgesamt sind in den Haupt- und Nebenbestandteilen keine Veränderungen zu verzeichnen. Nur sehr geringfügige Veränderungen haben sich in der gelösten Eisen-Ionen-Konzentration gezeigt. Kontinuierlich nahm der Gehalt beim Ausspeicherprozess bis 0,5 mg/l ab. Der Wert lag allerdings um 1,5 mg/l nach Umkehr des Prozesses und der Stillstandszeit wieder höher. Gleichzeitig war auch eine Abnahme im Redoxpotenzial zu verzeichnen.

Besonderer Augenmerk galt den chemische Eigenschaften der über der ursprünglichen Aquifertemperatur gespeicherten Fluide. Verglichen mit den Ausgangsanalysen und den abgekühlten Wässern lag hier der Hydrogencarbonat-Gehalt konstant 20 mg/l niedriger. Allerdings konnte keine messbare Veränderung im pH-Wert der Fluide registriert werden. Dass aber durch die Erwärmung des Wassers chemische Reaktionen ausgelöst werden, widerspiegelt der Vergleich in den Spurenbestandteilen. Der Nachweis erfolgte mittels ICP-MS (VTKA Rossendorf e.V.), wo zwar aufgrund des hohen Salzgehaltes Fehler durch notwendige Verdünnungen möglich sind, aber Tendenzen aufgezeigt werden können. So hat sich besonders der Zink-Gehalt um das 6fache erhöht.

3.2 Feststoffuntersuchungen

Feststoffuntersuchungen wurden zum einen an Gesteinsproben des Aquifers (Bohrkerne) mittels Polarisationsmikroskopie, Röntgendiffraktometrie (XRD) und Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) durchgeführt. Zum anderen wurden Filter mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) mit EDX-Analyse analysiert.

3.2.1 Petrographie des Aquifers

Als Aquifer fungieren Sandsteine der Oberer Postera-Schichten (Rhät). Diese Schichten lassen sich im Weiteren in einen oberen Speicher und einen Hauptspeicher gliedern, welche durch tonige Zwischenschichten getrennt sind. Die Sandsteine sind weiß bis grau gefärbt, organische kohlige Bestandteile sind enthalten. Überwiegend kann keine Schichtung oder auch Einregelung von Mineralen gefunden werden.

Der Anteil an Quarzkörnern liegt dabei bei 80 – 95 %, wobei das Mittel bei 93 % liegt. Es handelt sich um weiße bis graue Quarzkörner, die zum Teil sehr einschlusereich sind. Unter dem Polarisationsmikroskop löschen die Quarzkörner zu 93 % einheitlich, d.h. nicht undulös aus. Dieser hohe Anteil spricht für eine mehrfache Aufarbeitung der Quarzkörner, da diese gegen chemische und mechanische Einwirkungen weniger empfindlich sind, als undulös auslöschende und/oder Polyquarze. Der Anteil an Gesteinsbruchstücken in den Keuper-sandsteinen NE-Deutschlands liegt ausnahmslos unter 5 %, im Mittel bei 3 % (SCHOLLE 1992). Diese Gesteinsbruchstücke setzen sich wiederum ausnahmslos aus Quarz zusammen. Die Feldspäte in den Sandsteinen weisen generell einen Anteil von 3-7 % auf und setzen sich Plagioklassen und Kalifeldspäten (meist Mikroklin) zusammen.

Phyllosilikate sind in den matrixarmen Sandsteinen mit einem Anteil von 3-5 % vertreten, matrixreiche Sandsteine weisen auch Anteile bis 10 % auf. Kaolinit weist dabei einen Anteil von ca. 2 %, ansonsten konnten Illit und in geringen Mengen Glaukonit beobachtet werden. Zudem können Chlorit (klasitische Herkunft?), Smektite (Montmorillonit, Vermiculit), Mixed-Layer-Tone (Illit-Smektite, Illit-Chlorit) und detritische Helglimmer (Muskovit) unterschieden werden.

Als Mineralzemente sind Siderit, Kalzit, Dolomit, Anhydrit und im Bereich der kohligen Bestandteile auch Pyrit von Bedeutung.

Die Kornverteilung in diesen Feinsandsteinen weist Medianwerte von 80 – 180 µm (meist 90 – 120 µm) auf, der Mittelwert beträgt 115 µm. Die Sortierung kann als gut bis sehr gut angegeben werden ($S_o = 1,1 - 1,4$). Die Schiefe schwankt zwischen 0,88 – 1 (Mittelwert 0,96). Die Rundung der Körner kann als "angerundet bis gerundet" eingestuft werden (vgl. auch SCHOLLE 1992). Die Oberflächen weisen V- und U-förmige Vertiefungen, Anlöseerscheinungen sowie diagenetisch bedingte Blasteseerscheinungen auf.

Die Diageneseabfolge in den Rhätsandsteinen des Norddeutschen Beckens lässt sich in Auswertung der polarisationsmikroskopischen Untersuchungen und nach SCHOLLE (1992) wie folgt gliedern:

- Kaolinitzemente: unabhängig vom Teufenbereich und nahe kohligler Substanzen;
- Kalzitmentation: oberflächennah bis max. 1000 m. Ab dort unterliegen sie einer Dolomitisierung. Sie treten neben Feldspäten auf und ersetzen diese;
- Montmorillonit: frühdigenetisch aus Gesteinsbruchstücken (z.B. vulkanische Gläser) kommt bis in Tiefen von ca. 2500 m vor;
- Illitisierung des Montmorillonits und Bildung von mixed layer-Tonmineralen: die Illitisierung ist bei 1000 – 1500 m besonders intensiv;
- Quarzemente treten deutlich ab Tiefen von 1000 m auf;
- Dolomitmente treten ab 1000 m auf, ab ca. 1500 m bilden sich Dolomite aus Kalzit und Siderit.

3.2.2 Petrographie und Mineralogie der Abscheidungen im Filter

Im Rahmen des Betriebs des Tiefenspeichers werden die Tiefenwässer mit Raten bis zu 100 m³/h gefördert. Obertage wird dem Wasser über Wärmetauscher je nach Betriebsweise Wärme entzogen oder zugeführt. Anschließend werden die Wässer in eine zweite Bohrung reinjiziert. Um Schädigungen des Speichers durch Partikeleintrag zu vermeiden werden die Wässer Obertage gefiltert. In diesen Filtern werden somit Feststoffe abgeschieden, welche entweder dem Speicher entstammen oder aber im Zuge der Förderung gebildet/freigesetzt werden. Untersuchungsmaterialien sind etwa 1 m lange Beutelfilter, die alle 4 – 12 Wochen gewechselt werden. Diese Filter unterscheiden sich durch ihre einzelnen Filterschichten als auch durch die Maschenweiten.

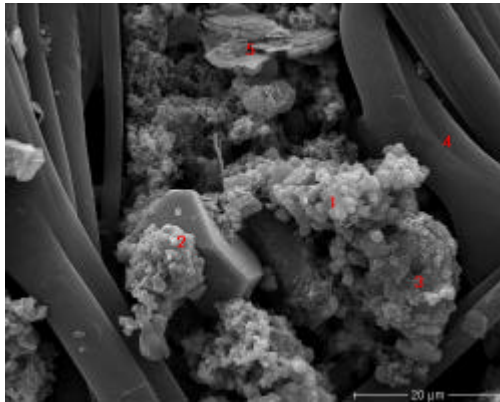


Abbildung 1: Füllung einer „Masche“ des Filters; 1 – hexagonale Kaolinitplättchen mit fadenförmigen Pyriten; 2/8 – euhedrale Pyrite; 3 – großes Chloritplättchen mit fadenförmigen Pyrit bewachsen; 4 – Fasern des Filters; 5 – großes Chloritmineral (REM-Aufnahme; SE)

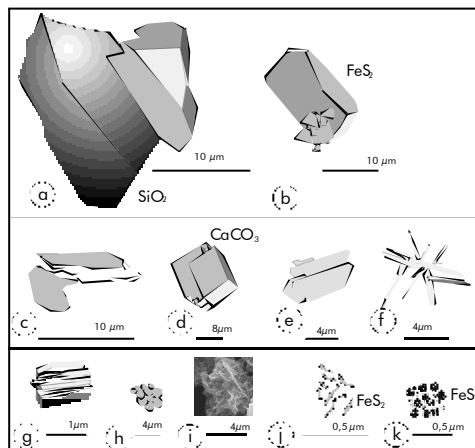


Abbildung 2: Beobachtete Haupt-Mineralphasen im Membranfilter

- a. Quarz: Große Individuen, gleichmäßig in geringer Dichte auf Filter verteilt.
- b. Pyrit: Große idiomorphe Individuen, sehr sporadisch verteilt
- c. Chlorit: plattig, groß, ausgefransten Rändern, in Stapeln vorkommend, sehr häufig;
- d. Kalzit: idiomorphe Kristalle, selten vorkommend;
- e. Kaolinit/ Chlorit: in ihrer Ausbildung ähnlich (c) aber pseudohexagonales Rissssystem;
- f. Aragonit: in Nestern vorkommend, häufig;
- g. Kaolinit/ Chlorit oder Illit: keine genauere Zuordnung möglich, häufig;
- h. Kaolinit: pseudohexagonale Mineralen, sehr häufig;
- i. Maschenillit: selten
- j. Pyrit/Eisen(hydr)oxid (mikrobiell) : fadenförmigen Bildungen auf Tonmineralen
- k. Pyrit/Eisen(hydr)oxid (mikrobiell): kugelförmig; teilweise Pyritoeder-Formen

In Abbildung 1 ist die Partikelbelastung einer solchen Filtermasche dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Fasern der genutzten Filterschicht. Es muss darauf hingewiesen werden, dass der Filter mit destilliertem Wasser gespült wurde. Parallele Untersuchungen mit ungespülten Filtern ergaben, dass die Filteroberflächen nach Trocknung des Filters mit einer Salzschieht überzogen waren, die sich aufgrund der hohen Salinität des Schichtwassers ausgebildet hatte. Aufwendige Untersuchungen ergaben, dass die beobachteten Minerale in den ungewaschenen Filtern mit denen der gewaschenen Filter vergleichbar waren. Aus diesem Grund beschränken sich alle weiteren Untersuchungen auf gewaschene Filter (Entfernung der Schichtwassersalze).

Bereits in der Übersichtsabbildung (Abbildung 1) wird die Vielfalt der Partikel deutlich. Abbildung 2 zeigt in Auswertung der Filteruntersuchungen unter Berücksichtigung der EDX-Analysen. Dabei können einige Minerale nur an ihrem Habitus identifiziert werden, da diese vollständig mit FeS_2 oder Fe^{3+} -Mineralen überzogen sind bzw. die Eisenphasen die eigentlichen Analysen „überstrahlen“.

Anteilig können ca. 60 – 70 % Tonminerale (Kaolinit, Chlorit, Illit), ca. 10 % Pyrit, ca. 10 % Eisen(hydr)oxide, ca. 5 % Quarz und untergeordnet Feldspäte, Kalzit, Anhydrit, Aragonit und weitere unterschieden werden.

3.3 Mikrobiologie

Extremophile Mikroben existieren auch unter schwierigsten Bedingungen, wie sie für geothermische Aquifere typisch sind (KÖHLER et al. 1997, 1997a). Dabei konnten Bakterien z.B. bis zu maximalen Temperaturen von 113 °C nachgewiesen werden (Blöchl et al. 1997). Günstige Lebensbedingungen für Bakterien sind bei Temperaturen zwischen 30 – 50°C gegeben, was dem Temperaturbereich des Neubrandenburger Postera-Aquifers entspricht. Aus diesem Grund wurden bakteriologische Untersuchungen von Fluid und Filtermaterial am Ende des Einspeicherprozesses und beim Ausspeichern durchgeführt. Eine gewisse vorhandene Bakterienaktivität widerspiegeln auch schon die REM/ SE-Bilder von Filtermaterial- Präparaten aus der Neubrandenburger Anlage (Abbildung 3).

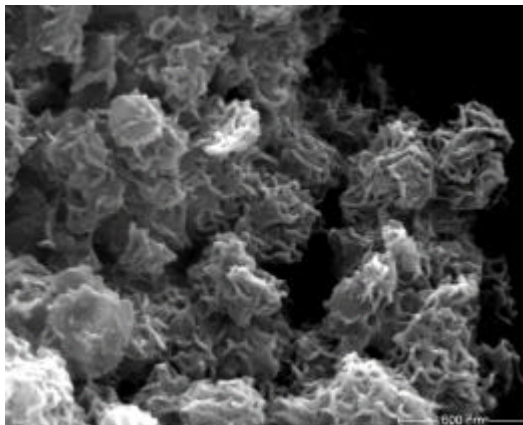


Abbildung 3: Fadenförmige FeS_2 -Bakterienausscheidungen auf Kaolinitplättchen (Filter Gt N4, REM/ SE-Bild)

Zum Lebendnachweis von Mikroorganismen wurde eine Fluidprobe und entsprechendes Filtermaterial am Ende des Einspeicherzyklus nach einem konventionellen Anreicherungsverfahren bei 30°C und 75°C in verschiedenen Komplex- und Spezialnährmedien kultiviert. Keinerlei Aktivität wurde bei 75°C registriert. Allerdings wurden sowohl im Filter als auch aus der Wasserprobe anaerobe heterotrophe Bakterien und sulfatreduzierende Bakterien (Laktat-, Wasserstoff-, Methan-Basis) bei 30°C nachgewiesen. Weiterführende Untersuchungen sind Gegenstand aktueller Forschungen (WÜRDEMANN et al. 2006, dieser Band) .

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Geochemische Veränderungen des genutzten Tiefenfluides

Von vornherein wurde davon ausgegangen, dass sich keine Veränderungen in den Haupt- und Bestandteilen ergeben. Allerdings zeigen die ersten Untersuchungsergebnisse des hydrogeochemischen Monitorings, dass durchaus Veränderungen, wenn auch in sehr geringem Maß, im Chemismus stattfinden. Die Ursache hierfür, insbesondere die Eisengehaltsschwankungen, können chemischer als auch mikrobiologischer Natur sein. Allerdings sind diese so minimal, dass andere biologische Marker wie Sulfat- und Sulfid-Gehalt sich nicht messbar verändern. Allerdings könnte die Erhöhung des Eisengehaltes versus Redoxpotenzialverringerung ein Indiz für Korrosion sein. Möglicherweise muss dies aber in Zusammenhang mit der 2monatigen Stillstandzeit der Anlage gebracht werden.

Weiterhin ist es erforderlich, die Gehalte der Spurenbestandteile, auch wenn diese nur im µg-Bereich gelöst vorliegen und verändern, zu kontrollieren. Denn Feststoffbildung ist dann wahrscheinlich, wenn gleichzeitig durch mikrobiologische Aktivität als Reaktionspartner Sulfid zur Verfügung stehen würde. Entsprechende geochemische Berechnungen stehen aber noch aus.

Insgesamt sind die beobachteten Veränderungen so gering, dass bei dem derzeitigen Betriebsregime keine negativen Folgen hinsichtlich Scaling und Permeabilitätsreduzierung durch Feststoffbildung zu erwarten sind.

4.2 Feststoffuntersuchungen

Im geothermischen Kreislauf des Wärmespeichers werden Partikel bewegt. Die Herkunft dieser Partikel kann prinzipiell sehr unterschiedlich sein. So könnten Bestandteile des Sandsteinspeichers (detritische Quarz- oder Feldspatkörner und Tone, diagenetisch gebildete Zementbildungen), im Zuge des geothermischen Betriebes neu gebildete Minerale oder auch Partikel aus den technischen Anlagen (Rost, Abrieb) erwartet werden. Tatsächlich wurden nun beobachtet:

primär gebildete detritische Partikel	sekundär gebildete, diagenetische Minerale
<i>Quarzkörner</i>	<i>Tone: Kaolinit, Illit/Smektit</i>
<i>Feldspatkörner: Kalifeldspat, Plagiklas</i>	<i>Karbonate: Kalzit</i>
<i>Tone: Chlorit, Glaukonit, Illit, Smektit</i>	<i>Eisenoxide – hydroxide?</i>
	<i>Pyrit, Chalkopyrit</i>
	<i>Quarzzement, SiO₂-Phasen</i>

Die oben genannten Bildungen sind alle natürlichen Ursprunges. Sie sind während der Förderung von Fluiden aus dem Speicher transportiert und im Filter abgelagert werden.

Daneben wurden verschiedene Mineralbildungen beobachtet, welche mit dem Betrieb des Wärmespeichers direkt oder indirekt zusammenhängen. Das sind Pyrit, Kalzit, aragonitischer Whiskerzement, Eisenoxid-Eisenhydroxidminerale und -überzüge.

Die Bildung von Pyrit kann verschieden interpretiert werden. Die frambiodalen Pyrite und fadenförmigen Bildungen auf Tonmineralen sind mit Sicherheit mikrobiell gebildet worden. Sulfatreduzierende Bakterien zeichnen sich verantwortlich. Als Abprodukt dieser Sulfatreduktion können die Kalzitbildungen interpretiert werden. Die idiomorph ausgebildeten Pyrite könnten hingegen auch durch elektrochemische Prozesse, Übersättigung (Sättigungsindex > 0) neu gebildet sein, eine Bildung durch mikrobielle Aktivität oder eine aber auch eine Entstehung im Zusammenhang mit der Gesteinsgenese kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Die Aragonitbildungen werden auf geringfügige Druckentlastungen innerhalb der obertägigen Anlagen zurückgeführt, welche trotz Druckhaltung nie ganz verhindert werden können, da es sich um dynamische Systeme handelt. Diese führt zur geringen Entgasung von CO₂ Was eine Ausfällung von CaCO₃ zur Folge hat.

Kritisch sind die mittels REM-EDX-Analyse identifizierten Eisenbildungen zu sehen. Die EDX-Analyse weist häufig eben nur Eisen und Sauerstoff nach. Um welche mineralogische Ausbildung es sich handelt, konnte bisher nicht ermittelt werden. Untersuchungen dazu sind geplant. Diese Eisenbildungen beschichten häufig die vorhandenen Tone und erschweren eine Identifikation der Mineralphasen, so dass ein Nachweis häufig über den Habitus der Einzelkristalle erfolgte.

Die Größe der transportierten Minerale variiert zwischen < 1µm bis 30 µm (vgl. Abbildung 2).

4.3 Mikrobiologischer Zustand des zirkulierenden Tiefenfluids

Die mikrobiologischen und petrologischen Untersuchungen weisen Bakterien nach, wobei offensichtlich die Sulfatreduzierer am Bedeutendsten sind (vgl. auch WÜRDEMANN et al. 2006). Die ersten Kultivierungen bei 30°C und 75°C zeigen, dass offensichtlich die Aktivität der nachgewiesenen Bakterien bei 75°C eingeschränkt ist. Hier konnten zunächst keine Bakterien zur Entwicklung gebracht werden. Kritisch scheint also der niedere Temperaturbereich, d.h. wenn das Thermalwasser wieder abgekühlt wird. Inwieweit die nachgewiesenen Mikroorganismen Einfluss auf den Betrieb des Wärmespeichers haben, soll anhand weiterführender Untersuchungen u.a. auch zum Nährstoffangebot in Abhängigkeit von den Speicherzyklen geklärt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines geochemischen Monitorings am Wärmespeicher Neubrandenburg konnten geringfügige Änderungen der Spurenelementgehalte beobachtet werden. Um diese Änderungen zu verifizieren müssen über einen weiteren Zyklus Messungen durchgeführt werden.

Die bisherigen Untersuchungen und Beobachtungen haben zwar nur Gültigkeit für den Wärmespeicher in Neubrandenburg, eine Übertragbarkeit sollte aber auf die mesozoischen Porenspeicher in Tiefenlagen >500 m möglich sein. Zum einen sind dort immer erhöhte Salinitäten aber auch ähnliche Aquifere (Sandsteintypen) vorhanden. Trotzdem ist es ratsam, für jeden Standort geochemische Betrachtungen hinsichtlich der maximal zu beaufschlagenden Temperatur durchzuführen, um Lösungs- und Fällungsreaktionen in Hinblick auf die Betriebssicherheit beurteilen zu können.

Dies gilt insbesondere dann, wenn flachere Aquifere und Aquifere anderer Speichertypen genutzt werden sollen. Zu nennen wäre zum Beispiel der Malm des Molassebeckens. Hier finden sich verkarstete, geklüftete Karbonate. Die Porenwässer sind niedrigsalinär (<1 g/l).

Deshalb sollten derartige Untersuchungen insbesondere unter Berücksichtigung der mikrobiologischen Flora auf verschiedene Standorte in Deutschland ausgeweitet werden.

Literatur

- BEUTLER, G., NTSCH, E. (2005): Paläogeographischer Überblick. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV – Keuper.- Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, **253**: 15-30.
- Blöchl, E., Rachel, R., Burggraf, S., Hafenbradl, D., Jansch, W. & Stetter, K.O. (1997): *Pyrobolus fumarii*, gen. And sp. Nov., represents a novel group of archea, extending the upper temperature limit for life to 113 °C.- *Extremophiles*, **1**: 14-21
- HOTH, P.; SEIBT, A., KELLNER, T.; HUENGENS, E. (Hrsg.), (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland.- GeoforschungsZentrum Potsdam, Scientific Technical Report STR 97/15
- KABUS, F., MÖLLMANN, G., HOFFMANN, F. (2004): Speicherung von Überschusswärme aus dem Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk Neubrandenburg im Aquifer, - Tagungsband GTV-Tagung in Landau vom 10.-12.11.2004, 63-71.
- KÖHLER, M. BOCHNING, S., VÖLSGEN, F. & HOFMANN, K. (1997): Mikrobiologie der Thermalwässer. –GFZ-Report STR 97/15: 95-100
- KÖHLER, M. BOCHNING, S., VÖLSGEN, F. & HOFMANN, K. (1997a): Untersuchungsmethoden zur geomikrobiologischen Charakterisierung der Thermalwässer. –GFZ-Report STR 97/15: 100-108.
- KÜHN, M. (1997): Geochemische Folgereaktionen bei der hydrogeothermalen Energiegewinnung. Dissertationsschrift Universität Bremen, FB Geowissenschaften
- LEHMANN, H.-W. (1974a): Geochemie der Tiefenwässer der Nordostdeutschen Senke, Teil 1.- *Zeitschrift für angewandte Geologie*, **20**: 502-509
- LEHMANN, H.-W. (1974b): Geochemie der Tiefenwässer der Nordostdeutschen Senke, Teil 2.- *Zeitschrift für angewandte Geologie*, **20**: 551-557
- NAUMANN, D. (2000). Salinare Tiefenwässer in Norddeuschland – Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermischen Nutzung. GFZ Potsdam Scient. Techn. Rep., STR00/2: 1-116.
- SCHOLLE, (1992):
- SEIBT, A., WOLFGGRAMM, M., SEIBT, P. (2006): Thermalsoleaquifere des Nordostdeutschen Beckens und ihre balneologische Nutzung.- dieser Tagungsband.
- WÜRDEMAN, H., VIETH, A., METHLING, R., SEIBT, A., WOLFGGRAMM, M. (2006): Mikrobiologie geothermisch genutzter Aquifere: Untersuchungen zum Einfluss auf die Betriebssicherheit, GTV-Tagung, dieser Band
- WOLFGGRAMM, M., KABUS, F., SEIBT, P. (2005): Die geothermische Nutzung des tieferen Untergrundes in Neubrandenburg.- *Neubrandenburger Geol. Beitr.*, **5**: 35-46.
- WOLFGGRAMM, M., SEIBT, A. HURTER, S. & ZIMMERMANN, G. (2002): Origin of geothermal fluids of Permo-Carboniferous rocks in the NE German Basin (NE Germany).- *Journal of Geochemical Exploration*.- 78-79, 127-131.