

Ex-Situ-Untersuchungen zum Abbau eines Scaling-Inhibitors, zur Beeinflussung der Korrosionsrate und Bestimmung der Biozönose in geothermischen Anlagen

Beate Schulz¹, Christoph Otten¹, Sebastian Teitz², Anja Narr¹, Yasemin Civrilli¹, Florian Eichinger⁴, Andrea Seibt⁵, Dietmar Kuhn⁶, Hilke Würdemann^{1,3}

1 - Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg

2 - Sebastian Teitz, Laboranlagen, Sensorik, Automation, Bei der Kirche 3, 18334 Dettmannsdorf

3 - Deutsches GeoForschungsZentrum – GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

4 - Hydroisotop GmbH, Woelkestr. 9, 85301 Schweitenkirchen

5 - BWG Geochemische Beratung GmbH, Seestrasse 7A, 17033 Neubrandenburg

6 - Karlsruher Institut für Technologie, Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Keywords: Geothermie, Mikrobiologie, mikrobiell induzierte Korrosion, Ausfällungen, Scaling-Inhibitor

Zusammenfassung

Der biologische Abbau eines Ausfällungsinhibitors wurde in Laborversuchen unter anaeroben, *in-situ*-ähnlichen Bedingungen (Molassebecken) untersucht. Innerhalb von 140 Tagen wurde der Inhibitor fast vollständig zu Acetat, Formiat, Methan und CO₂ abgebaut. Außerdem wurde der Einfluss der Biofilmbildung auf die Korrosionsrate von Stahlcoupons in salinen Fluiden (Norddeutsches Becken) erforscht. Eine Erhöhung der Nährstoffzufuhr hatte eine Zunahme der Abundanz und leicht erhöhte Korrosionsraten zur Folge. Allerdings lagen die Korrosionsraten um den Faktor 10 niedriger als die *in-situ*, in einem Bypass gemessenen Raten. Die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft (Biozönose) wurde mittels genetischer Fingerprinting- und Mikrobiomanalysen charakterisiert.

1. Einleitung

Sowohl Korrosion an Anlagenteilen als auch mineralische Ausfällungen im Nahbereich der Injektionsbohrung oder im Wärmetauscher können den Betrieb geothermischer Anlagen beeinträchtigen (Würdemann *et al.*, 2016). In der geothermischen Anlage in Unterhaching (Molassebecken) ist insbesondere Calcit-Scaling eine Herausforderung (Wanner *et al.*, 2017), während die Anlage in Neubrandenburg (Norddeutsches Becken) neben einer Minderung der Injektivität durch Ausfällung von Eisensulfiden auch durch Korrosion an der Förderbohrung auf der kalten Seite des Wärmespeichers beeinträchtigt wird (Würdemann *et al.*, 2014). Viele der herkömmlich verwendeten Scaling-Inhibitoren sind nur schwer biologisch abbaubar. Insbesondere Polycarboxylate können außerordentlich stabil sein und bauen sich in der Natur nur sehr langsam ab. Auch wenn die akute Toxizität als relativ gering eingeschätzt wird, kann eine Akkumulation in der Umwelt unerwünschte Folgen haben. Eine Voraussetzung für die Genehmigung des Einsatzes von Scaling-Inhibitoren im Molassebecken ist ihre biologische Abbaubarkeit. Daher wurden Abbauprobeversuche unter *in-situ*-ähnlichen Bedingungen durchgeführt und die Abbauprodukte bilanziert sowie die mikrobielle Biozönose charakterisiert.

Der in der Anlage in Unterhaching eingesetzte Scaling-Inhibitor NC47.1B der Firma Niederrhein Chemie GmbH ist ein Kammpolymer mit Polycarboxylat-Seitenketten (Abb. 1), das über einen *threshold*-Effekt die Bildung von Kristallkeimen verhindert. Das Grundgerüst besteht aus einem Polysaccharid, welches das Molekül für eine Biodegradation zugänglich macht.

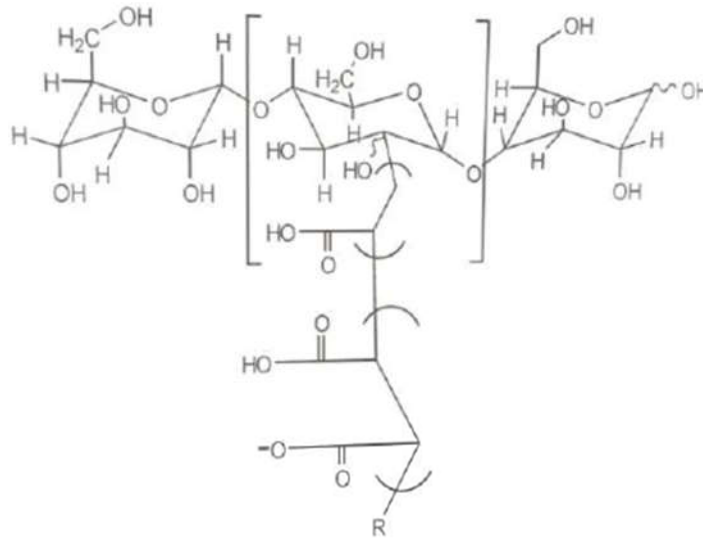


Abb. 1: Struktur des in Unterhaching eingesetzten Scaling-Inhibitors NC47.1B von der Firma Niederrhein Chemie GmbH (Martin Sieben, 2016). Das Grundgerüst des Kammpolymers besteht aus einem leicht biologisch abbaubaren Polysaccharid mit Seitenketten aus Acryl- und Maleinsäure.

Komplexe organische Moleküle werden unter Ausschluss von Sauerstoff (anaerobe Bedingungen) zunächst von fermentierenden Bacteria zu kurzkettingen organischen Säuren, Alkoholen sowie Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff abgebaut. Methanogene Archaea können Abbauprodukte wie Acetat unter Bildung von Methan und Kohlenstoffdioxid verwerten (acetoklastische Methanogenese) oder aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff Methan bilden. Sulfatreduzierende Bakterien setzen Stoffwechselprodukte der Fermentierer wie Lactat und Acetat um und reduzieren dabei Sulfat zu Sulfid. Daneben können Sulfatreduzierer auch Wasserstoff zur Reduktion von Sulfat verwenden (Cypionka, 2010).

Zur Verminderung der Biofilmbildung und der damit verbundenen Korrosion wurden am Wärmespeicher in Neubrandenburg Hitzeschock-Versuche durchgeführt, in denen die Temperatur in der oberirdischen Anlage und in der Injektionsbohrung kurzzeitig auf etwa 78 °C erhöht wurde. Um unter kontrollierten Bedingungen die erforderliche Dauer und Häufigkeit der Hitzeschocks zu bestimmen, wurden im Labor die Auswirkungen verschiedener Zusätze auf die Korrosionsrate und die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft untersucht sowie die Abundanz der Bacteria mit molekularbiologischen Methoden (genetisches Fingerprinting, Mikrobioanalysen, quantitative PCR) bestimmt.

2. Material und Methoden

Versuchsansätze: 400 mL bzw. 800 mL Fluid aus den Geothermieanlagen der Standorte Neubrandenburg (biologisch induzierte Korrosion in salinen Fluiden) oder Unterhaching (anaerober Abbau des Inhibitors) wurde in 500 mL- bzw. 1 L- Glasflaschen gefüllt. Zudem wurde je ein Coupon aus Schwarzstahl eingesetzt. Für die Abbauprobungen wurden die Ansätze mit bis zu 1200 mg/L Inhibitor versetzt. Die Konzentrationen lagen damit um das bis zu 240-fache über dem in der Anlage eingesetzten Wert von 5 bis 10 mg/L. Zusätzlich wurden in die Abbauprobungen 200 g bzw. 280 g Analoggestein (Frankendolomit) im Verhältnis 1:2,8 bis 1:4 (w/v) zugegeben. Ansätze ohne Gestein und nicht angeimpfte Ansätze wurden als Kontrollen mitgeführt.

Für die Korrosionsversuche mit verschiedenen Nährmedien wurden 200 mL des Fluids der Anlage Neubrandenburg durch Baar's-Medium, Postgate C-Medium (Ismail *et al.*, 2014) bzw. Postgate Medium B (Ghazi *et al.*, 2011) ersetzt. Für Versuche zur Nährstoffzugabe wurde alle 14 Tage Medium C nach Postgate (7 mg/L bzw. 20 mg/L DOC entsprechend) in die Ansätze gegeben.

Die Versuchsansätze wurden mit Biofilm vom jeweiligen Standort angeimpft, mit Stickstoff beaufschlagt und bei 40 °C mehrere Monate inkubiert.

Gasanalyse: 500 µL Gas wurden den Versuchsansätzen entnommen und mit einem Gaschromatographen mit WLD analysiert.

Organische Säuren: 500 µL Fluid wurden entnommen und verdünnt. Die Analyse erfolgte durch Ionenchromatographie mit Leitfähigkeits-Detektor.

Inhibitorkonzentration: 50 µL Fluid wurden in 850 µL Phosphatpuffer (pH 7, 100 mmol/L) gegeben. 30 µL einer 1 mmol/L Farbstofflösung (Pinacyanolchlorid) wurden zugegeben. Die Messung erfolgte durch UV/VIS-Spektroskopie bei 550 nm. Zudem wurde die Inhibitorkonzentration mittels HPLC (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie) durch die Firma Hydroisotop GmbH bestimmt. Hierbei wird die zu analysierende Probe eingedampft und auf ein definiertes Volumen mit organischer Säure (Katalysator), einem organischen Lösungsmittel und dem Derivatisierungsreagenz Fmoc-Hydrazin (Fluoreszenzmarker) versetzt und der Inhibitor mittels HPLC mit FLD (Fluoreszenz Detektor) quantifiziert.

Korrosionsrate: Die Korrosionsrate wurde aus der Massedifferenz der Stahlcoupons nach folgender Formel berechnet: $KR = \Delta m / (\rho \times A \times t)$. Dabei ist Δm die Gewichtsänderung, ρ = Dichte (hier: 7,856 g/cm³), A = Couponoberfläche und t = Expositionszeit.

Genkopien: Die DNA aus dem Fluid bzw. dem Biofilm der Couponoberfläche wurde isoliert und durch qPCR mit den Primern 331F und 797R (Nadkarni *et al.*, 2002) und SensiFast™ SYBR No-Rox-Kit (bioline) amplifiziert. Die Schmelzkurve wurde ebenfalls analysiert und die Effizienz der Reaktion bestimmt.

Fingerprinting: Das genetische Fingerprinting wurde durch Amplifikation der 16S rRNA (Primer 338F und 805R) der Bacteria und anschließende Denaturierende Gradientengelelektrophorese (PCR-DGGE) in Anlehnung an Westphal *et al.*, 2017 erstellt.

Mikrobiomanalyse: Die Mikrobiomanalysen wurden von Eurofins Genomics Germany GmbH durchgeführt.

Gelöster organischer Kohlenstoff: Der DOC wurde durch die Hydroisotop GmbH an einem TOC-VCSH-Gerät gemessen.

Isotopenanalysen: Deuterium und Kohlenstoff-13-Analysen wurden durch die Firma Hydroisotop GmbH durchgeführt.

3. Untersuchungen zum anaeroben Abbau des Scaling-Inhibitors

Im Verlauf des anaeroben Inhibitorabbaus (nach 354 Tagen) wurden bis zu 230 mg/L organische Säuren (Acetat) gebildet und über 16 Vol.% Methan in der Gasphase nachgewiesen (Abb. 2 und 3). Aufgrund von Ausgasungen aus dem Fluid stieg der Methangehalt in der Gasphase auch in nicht angeimpften Kontrollansätzen (D1 bis D4) nach einem Tag auf 1,2 Vol.% bis 1,9 Vol.% Methan und blieb anschließend konstant (Abb.2). In den angeimpften Ansätzen mit 120 mg/L Inhibitor stieg die Methankonzentration dagegen auf bis 7,2 Vol.%. Bei einer Erhöhung der Inhibitorkonzentration auf 1200 mg/L Inhibitor lag die Methankonzentration mit 16,8 Vol.% etwa doppelt so hoch (Abb.2).

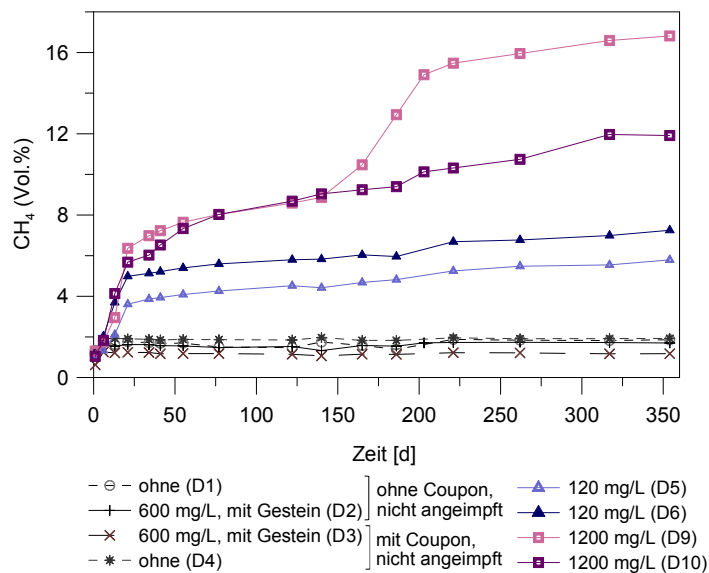


Abb.2: Bildung von Methan beim mikrobiellen Abbau des Inhibitors bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen.

Die Acetat-Konzentration blieb in den nicht angeimpften Kontroll-Ansätzen ohne Gestein und Inhibitor (D1, D4) über den gesamten Versuchszeitraum bei den Ausgangswerten von 8,4 mg/L. Kontrollansätze mit Gestein und 600 mg/L Inhibitor (D2, D3) sowie angeimpfte Ansätze mit

120 mg/L Inhibitor (D5, D6) zeigten mit bis zu 52 mg/L eine Zunahme der Acetat-Konzentration um das 3- bis 8-fache gegenüber den Ausgangswerten. Wird die unterschiedliche Ausgangskonzentration des Inhibitors berücksichtigt, zeigt sich, dass in den angeimpften Ansätzen die zwei bis dreifache Menge des Inhibitors in Acetat umgesetzt wurde. Eine Erhöhung der Inhibitor-Konzentration auf das 10-fache (1200 mg/L) führte mit bis zu 230 mg/L Acetat zu einer bis 28-fach höheren Acetat-Konzentration gegenüber den Ausgangswerten (Abb. 3). Ein Vergleich mit den nicht angeimpften Kontrollen mit Inhibitor belegt, dass sowohl die Methanbildung als auch die Acetatbildung auf mikrobielle Stoffwechselaktivität zurückzuführen sind.

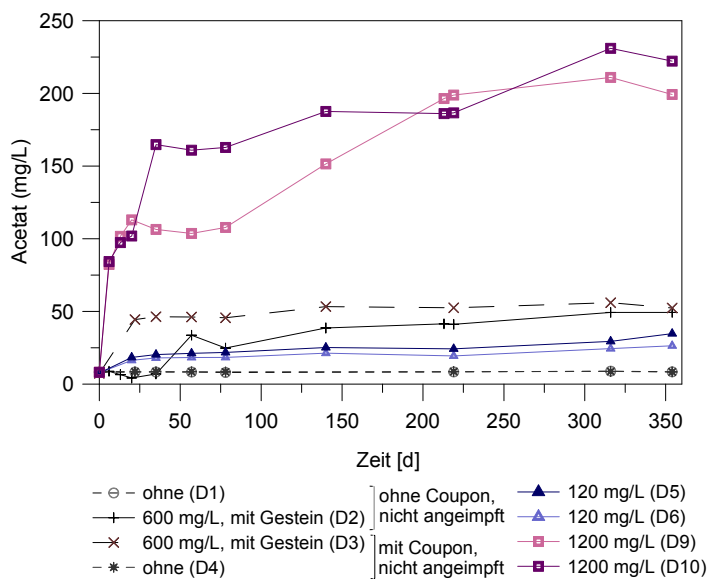


Abb.3: Bildung organischer Säuren (Acetat) beim mikrobiellen Abbau des Inhibitors bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen (120 mg/L bis 1200 mg/L).

Neben der Beobachtung des Inhibitorabbaus anhand von Stoffwechselprodukten wurde die Abnahme der Inhibitor-Konzentration durch chemische Analysen quantifiziert. Dazu wurden ein UV/VIS- und ein HPLC-basiertes Verfahren etabliert. Das UV/VIS-Verfahren nutzt die metachromatischen Eigenschaften bestimmter Farbstoffe, welche sich bei der Interaktion mit ladungstragenden Polymerketten verfärben. Auf diese Weise kann der Inhibitor anhand seiner wirksamen Komponente mit geringem Aufwand quantifiziert werden. Zudem werden auch Fragmente aus einem unvollständigen Abbau des Polymers mit dieser Methode erfasst. Nachteilig ist allerdings die geringe Genauigkeit bei niedrigen Analytkonzentrationen (< 10 mg/L). Daher ist dieses Verfahren nicht für eine Spurenanalytik geeignet. Im Gegensatz dazu können durch das HPLC-Verfahren auch Spuren des Inhibitors im ppb-Bereich nachgewiesen werden. Das Verfahren setzt allerdings eine aufwändige Probenvorbereitung und instrumentelle Analytik voraus. Durch die Trennung auf der Säule werden vollständige Moleküle und Molekülbruchstücke aus dem Abbau gesondert erfasst, wobei hier nur die vollständigen Moleküle eindeutig zugeordnet und quantifiziert wurden.

Aus der oben erwähnten Versuchsreihe wurden nach 140 Tagen Inkubation die Konzentrationen des Inhibitors und seiner Abbauprodukte sowie der DOC (gelöster organischer Kohlenstoff als Summenparameter zur Erfassung der organischen Verbindungen) bestimmt. Nach 140 Tagen lag die Konzentration des Inhibitors laut HPLC-Bestimmung in den Ansätzen bei 0,4 % bis 1,1 % der jeweiligen Ausgangskonzentration. Dies entspricht dem Anteil intakter Inhibitor-Moleküle. Nach der UV/Vis-Methode waren noch 3 % bis 21 % der Ausgangskonzentration enthalten, was dem Anteil funktioneller Seitenketten entspricht. Eine Bilanz des organischen Kohlenstoffs zeigt, dass nach 140 Tagen Inkubation der Inhibitor weitgehend zu Acetat (Anteil am DOC 41 – 70 %) und Formiat (Anteil am DOC 0 – 33 %) abgebaut war. Zudem waren 1,2 % bis 20 % des Kohlenstoffs im Inhibitor bereits in Methan umgewandelt (Abb.4).

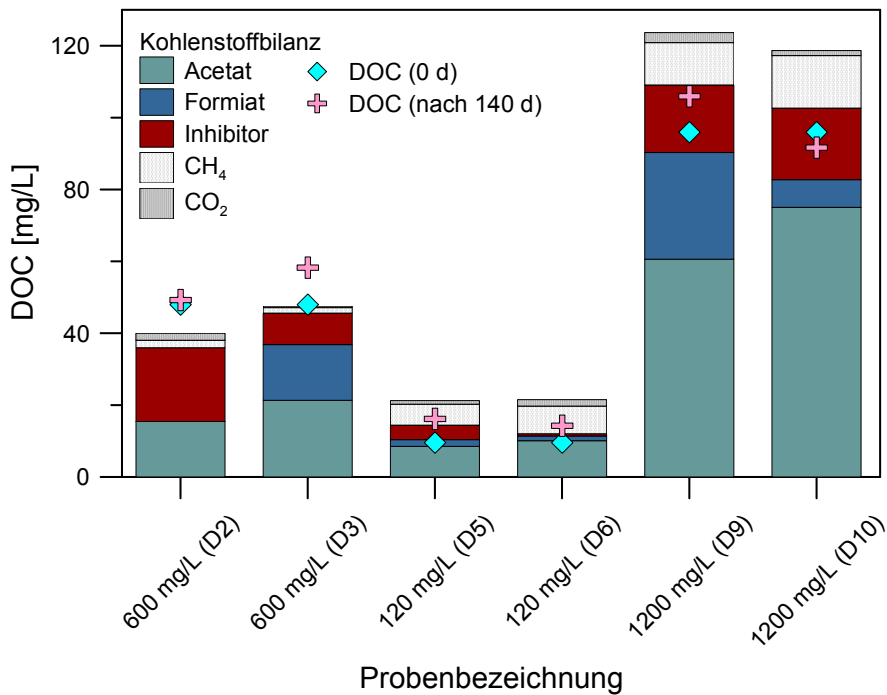


Abb. 4: Kohlenstoffbilanz nach 140 Tagen Abbau: In allen mit Biofilm angeimpften Ansätzen hat die Inhibitorkonzentration um 79-97 % bezogen auf die Ausgangskonzentration (\blacklozenge) abgenommen. Als Abbauprodukte wurden hauptsächlich Acetat (41-70 %) und Formiat (0-33 %) identifiziert. Ein Teil wurde bereits in Methan umgewandelt (1,2-20 %). Der DOC nach 140 Tagen ist durch (+) dargestellt. Blau: organische Säuren (Acetat und Formiat), rot: Inhibitor (wirksame Polymerkette), grau gemustert: CH₄ und CO₂.

Der biogene Ursprung des Methans wurde in einer weiteren Versuchsreihe auch durch Isotopenanalysen bestätigt (Tab.1). Die Beurteilung des Verhältnisses zwischen Kohlenstoffisotop und Deuterium im Methan ($\delta^{13}\text{C-CH}_4$ und $\delta^2\text{H-CH}_4$) weist auf eine acetoklastische Methanogenese hin.

Tabelle 1: Methankonzentration und Isotopenanalysen des ¹³C und ²H im Methan der Gasphasen zweier Ansätze einer Versuchsreihe zum Inhibitorabbau.

Ansatz	120 mg/L Inhibitor	1200 mg/L Inhibitor
Gasphase CH ₄ (Vol.%)	8,2	16,3
Isotopie δ ¹³ C-CH ₄ (‰)	-55,8	- 58,8
Isotopie δ ² H-CH ₄ (‰)	-343	-357

Mittels Mikrobiomanalyse wurde die Biozönose in zwei Ansätzen mit unterschiedlich starker Methanbildung (600 mg/L bzw. 1200 mg/L Inhibitor) charakterisiert (Abb. 5) Es wurden sowohl Fermentierer der Klasse *Clostridia* als auch Methanbildner der Gattungen *Methanosarcina*, *Methanomassiliicoccus* und *Methanothermobacter* identifiziert. Zu den *Clostridia* gehören Vertreter der Gattungen *Sporomusa* und *Clostridium*, die den Inhibitor zu Acetat und Formiat abbauen. Die identifizierten Vertreter der methanogenen Archaea können organische Säuren und/oder Wasserstoff zur Bildung von Methan nutzen.

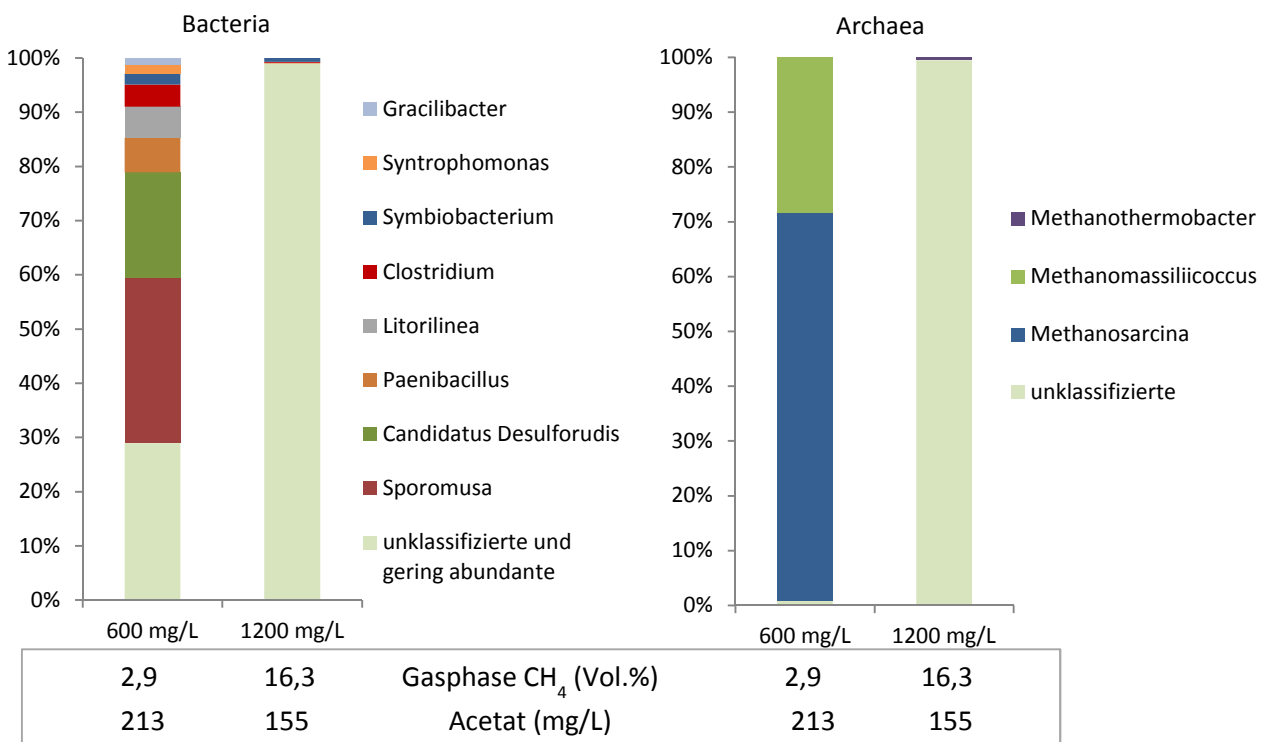


Abb.5: Charakterisierung der mikrobiellen Gemeinschaft (Mikrobiomanalyse) in zwei Ansätzen zum Inhibitorabbau nach 154 Tagen Inkubation

Die Kohlenstoffbilanz belegt, dass der Inhibitor unter anaeroben Bedingungen nahezu vollständig abgebaut wird. Vertreter entsprechender anaerober Stoffwechselwege wurden anhand von Mikrobiomanalysen identifiziert.

3. Untersuchungen zu mikrobiell induzierter Korrosion

Um den Korrosionsprozess in der Geothermieanlage Neubrandenburg im Labor nachzustellen, wurde Fluid aus der Anlage mit Biofilm angeimpft und bei 40 °C unter anaeroben Bedingungen inkubiert. Die Korrosionsrate wurde durch den Gewichtsverlust an Coupons aus Schwarzstahl ermittelt. Um die kontinuierliche Zufuhr im fließenden System zu simulieren, wurden den Standversuchen regelmäßig Nährstoffe zugegeben. In Vorversuchen wurde das Nährmedium C nach Postgate (Ismail *et al.*, 2014) als das geeignetste zur Stimulation des mikrobiellen Wachstums ermittelt (Abb 6). Bereits geringe Zugaben an Nährstoffen förderten das bakterielle Wachstum. Daher nahm die Abundanz an Bacteria (16S rRNA Genkopien) zu (Abb. 7). Die Korrosionsraten waren gegenüber der Kontrolle nur geringfügig (etwa 20 %) erhöht und um eine Zehnerpotenz niedriger als *in situ*. Allerdings korrelierte die Korrosionsrate mit der Abundanz von Bacteria und Sulfatreduzierern (SBR) im Biofilm. Dies weist auf einen Zusammenhang zwischen mikrobieller Stoffwechselaktivität und der Korrosionsrate hin. Offenbar fördert die Strömung und die damit verbundene Zufuhr von Nährstoffen sowie der Abtransport von Abbauprodukten und die mechanische Einwirkung die Korrosion in der Anlage. Eine Simulation der Bedingungen im fließenden System wie die regelmäßige Durchmischung, die Zugabe von Nährstoffen und ein regelmäßiges mechanisches Lösen des Biofilms konnten bisher noch nicht die *in-situ* bestimmten Korrosionsraten reproduzieren. Mittels genetischem Fingerprinting und Mikrobiomanalyse wurden im Biofilm vor allem Vertreter der Klasse *Clostridia* nachgewiesen. Dazu zählen u.a. die Sulfatreduzierer *Dethiosulfatibacter aminovorans* und *Desulfallas geothermicus*. Zudem wurden halophile Fermentierer aus der Familie der *Halanaerobiaceae* detektiert.

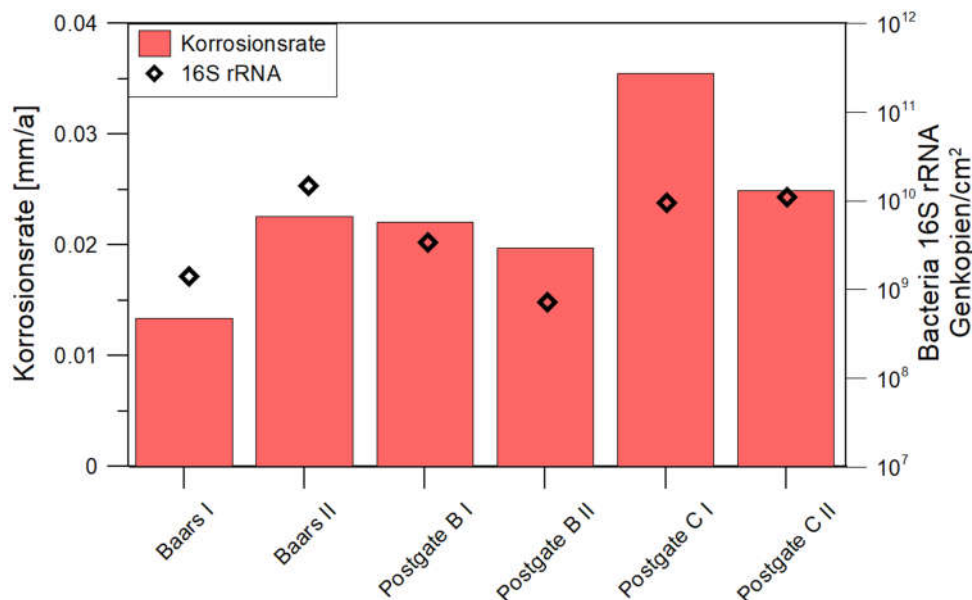


Abb.6: Korrosionsraten und Abundanzen im Biofilm der Stahlcoupons bei Zugabe unterschiedlicher Nährmedien nach 32 Tagen Inkubation. Den mit (II) gekennzeichneten Versuchsansätzen wurde zusätzlich Laktat zugesetzt. Die Ansätze mit dem Nährmedium C nach Postgate zeigten gegenüber den anderen getesteten Nährstofflösungen erhöhte Korrosionsraten sowie höhere Abundanzen an Bacteria (◇).

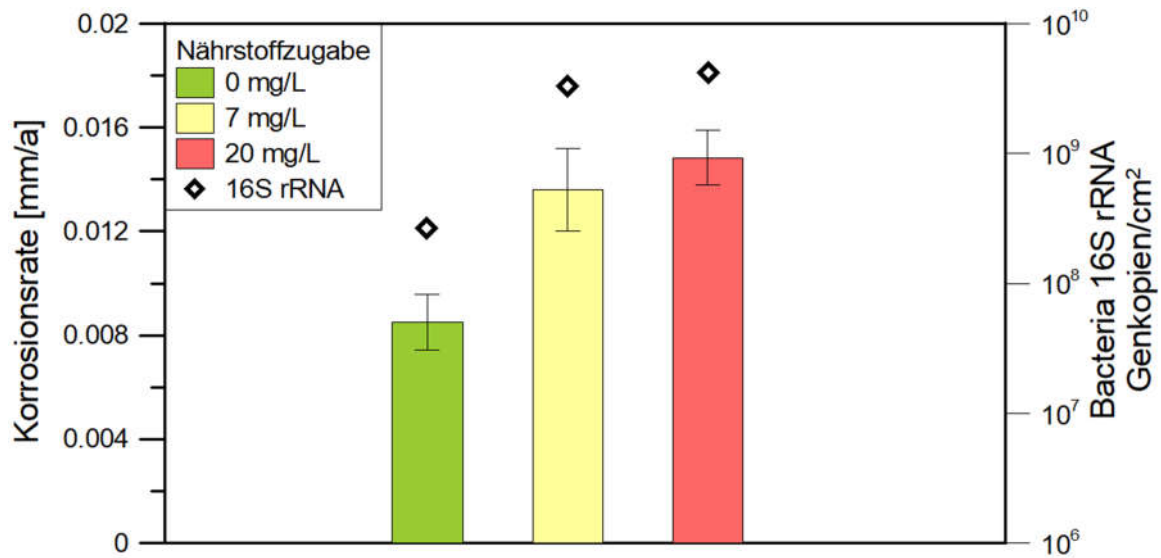


Abb.7: Korrosionsraten bei unterschiedlichen Nährstoffzugaben nach 83 Tagen Inkubation. Grün: ohne Zugabe, gelb: 7 mg/L Nährmedium, rot: 20 mg/L Nährmedium. Die Ansätze mit Nährstoffzugabe zeigen erhöhte Korrosionsraten (etwa 20 %) sowie höhere Abundanzen (◊). Die Standardabweichung ist als Fehlerbalken dargestellt.

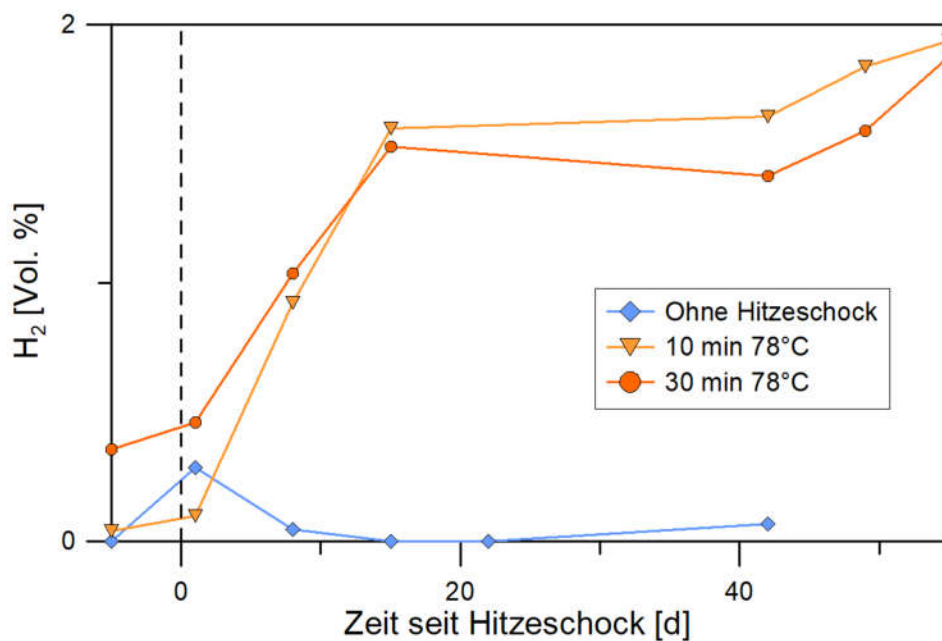


Abb. 8: Wasserstoffentwicklung während der Hitzeschockversuche. Blau: Kontrolle ohne Hitzeschock, orange: kurzer Hitzeschock (10 Minuten), rot: langer Hitzeschock (30 Minuten). Der Zeitpunkt des Hitzeschocks ist als gestrichelte Linie markiert. Während der Wasserstoffanteil in der Kontrolle ohne Hitzeschock (♦) nahezu bei 0 Vol.% verbleibt, ist bei den Ansätzen, die einem Hitzeschock von 78 °C über einen Zeitraum von 10 Minuten (▼) und 30 Minuten (●) ausgesetzt waren, eine Zunahme auf etwa 2 Vol.% zu beobachten. Dies weist auf eine sehr effektive Verminderung der mikrobiellen Aktivität hin.

In weiteren Versuchen wurden die Auswirkungen eines Hitzeschocks auf die Biozönose und die Korrosionsrate untersucht. Dazu wurden Ansätze nach 105 Tagen einem Hitzeschock (78 °C) von 10 bzw. 30 min. ausgesetzt. In den Ansätzen mit Hitzeschock wurde über den nachfolgenden Zeitraum ein Anstieg der Wasserstoffkonzentration auf etwa 2 Vol.% beobachtet (Abb. 8). Offensichtlich wurde der aus Korrosionsprozessen stammende Wasserstoff nach dem Hitzeschock nicht mehr mikrobiell verwertet. Daher stieg die Wasserstoffkonzentration an. 21 und 56 Tage nach dem Hitzeschock wurde die Biozönose molekularbiologisch charakterisiert und die Korrosionsrate bestimmt. Während nach 21 Tagen noch kein signifikanter Einfluss des Hitzeschocks auf die Korrosionsrate festgestellt werden konnte, zeigten die Ansätze nach 56 Tagen im Vergleich zur Kontrolle eine leicht verminderte Korrosionsrate (Abb. 9). Dies weist darauf hin, dass sich der Biofilm nach 56 Tagen noch nicht vollständig regeneriert hatte. Zwischen den langen und kurzen Hitzeschocks wurde kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Korrosionsrate festgestellt. Die Versuche zeigen, dass bereits ein kurzer Hitzeschock die Korrosionsrate über einen längeren Zeitraum vermindert.

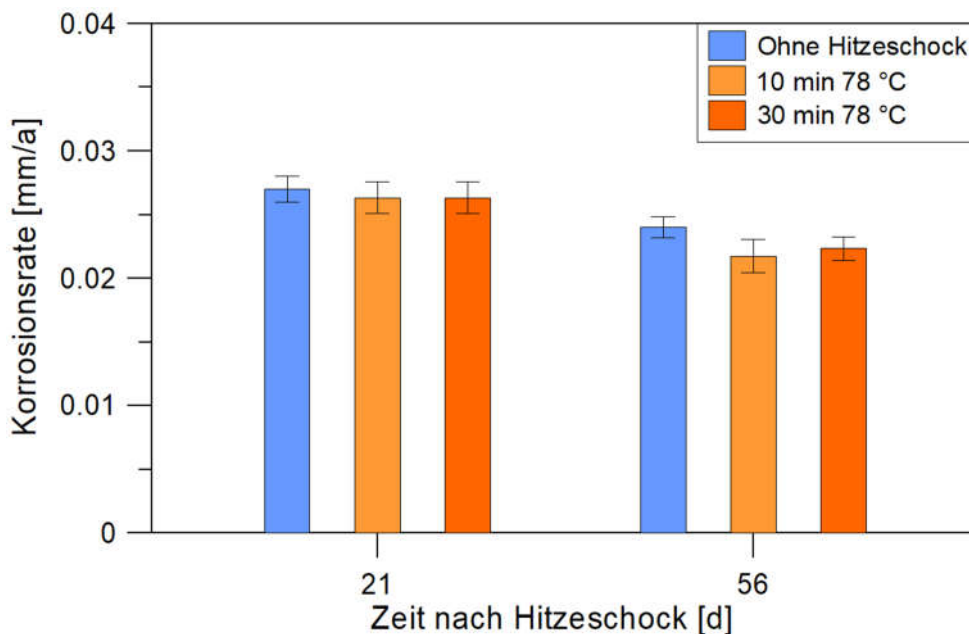


Abb. 9: Korrosionsraten nach dem Hitzeschock. Blau: Kontrolle ohne Hitzeschock, orange: kurzer Hitzeschock (10 Minuten), rot: langer Hitzeschock (30 Minuten). Während nach 21 Tagen noch kein signifikanter Effekt zu beobachten ist, sind nach 56 Tagen die Korrosionsraten in den Kontrollansätzen gegenüber den mit Hitzeschock behandelten Ansätzen leicht erhöht.

Die Fingerprinting-Analyse des Biofilms ergab keine Unterschiede in der Zusammensetzung der Biozönose zwischen den Ansätzen mit und ohne Hitzeschockbehandlung. In allen Versuchen wurden Vertreter der *Clostridiales* und *Firmicutes* gefunden. Es wurden die fermentierenden Bacteria *Halanaerobium sehlinese* (96,6 % Ähnlichkeit) und *Halanaerobium saccharolyticum* (98,6 %), sowie der Sulfatreduzierer *Desulfallas geothermicus* (96,0 % Ähnlichkeit) identifiziert. Bei der Bewertung des Ergebnisses ist zu beachten, dass beim Fingerprinting-Verfahren auch DNA

inaktiver oder toter Zellen erfasst wird. Da die Zusammensetzung der Biozönose unverändert blieb, ist eine Selektion auf hitzeresistente Sporenbildner in diesem Zeitraum auszuschließen, da dies die Zusammensetzung der Biozönose und damit das Fingerprint-Muster verändert hätte, weil sich durch die Selektion die Dominanz einzelner Vertreter erhöht hätte.

Quellenverzeichnis

- Cypionka, H. (2010), Grundlagen der Mikrobiologie, *Springer-Lehrbuch*, 4., überarb. und aktual. Aufl., Springer, Heidelberg.
- Ghazy, E.A., Mahmoud, M.G., Asker, M.S., Mahmoud, M.N., Abo Elsoud, M.M., and Abdel Sami, M.E. (2011). Cultivation and Detection of Sulfate Reducing Bacteria (SRB) in Sea Water. *J. Am. Sci.* 7, 604–608.
- Ismail, M., Yahaya, N., Bakar, A.A., and Noor, N.M. (2014). Cultivation of sulphate reducing bacteria in different media. *Malays. J. Civ. Eng.* 25, 456–465.
- Martin Sieben (2016), Informationen zu dem Kalkinhibitor NC47.1B, Mitteilung, Kevelaer.
- Nadkarni *et al.* (2002), Determination of bacterial load by real-time PCR using a broad-range (universal) probe and primers set, *Microbiology*, Vol. 148, pp. 257-266
- Wanner, C., Eichinger, F., Jahrfeld, T. and Diamond, L.W. (2017), “Causes of abundant calcite scaling in geothermal wells in the Bavarian Molasse Basin, Southern Germany”, *Geothermics*, Vol. 70, pp. 324–338.
- Westphal, A., Kleyböcker, A., Jesušek, A., Lienen, T., Köber, R., Würdemann, H. (2017) Aquifer heat storage: abundance and diversity of the microbial community with acetate at increased temperatures, *Environ Earth Sci*, 76:66
- Würdemann, H., Westphal, A., Kleyböcker, A., Miethling-Graff, R., Teitz, S., Kasina, M., Seibt, A., Wolfgramm, M., Eichinger, F. and Lerm, S. (2016), “Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen”, *Grundwasser*, Vol. 21 No. 2, pp. 93–106.
- Würdemann, H., Westphal, A., Lerm, S., Kleyböcker, A., Teitz, S., Kasina, M., Miethling-Graff, R., Seibt, A. and Wolfgramm, M. (2014), “Influence of Microbial Processes on the Operational Reliability in a Geothermal Heat Store – Results of Long-term Monitoring at a Full Scale Plant and First Studies in a Bypass System”, *Energy Procedia*, Vol. 59, pp. 412–417.

Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg

hilke.wuerdemann@hs-merseburg.de