

# Einsatz von Scaling-Inhibitoren an drei geothermischen Anlagen im Süddeutschen Molassebecken – Wirksamkeit des Inhibitors sowie Änderung der Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose und Nachweis des biologischen Abbaus *in situ*

Hilke Würdemann<sup>1</sup>, Christoph Otten<sup>1</sup>, Alexander Holtzegel<sup>1</sup>, Anja Striegel<sup>1</sup>, Sebastian Teitz<sup>2,4</sup>, Benedikt Broda<sup>3</sup>, Bernhard Köhl<sup>3</sup> und Florian Eichinger<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg, hilke.wuerdemann@hs-merseburg.de

<sup>2</sup> Teitz Laboranlagen, Bei der Kirche 3, 18334 Dettmannsdorf

<sup>3</sup> Stadtwerke München GmbH, Emmy-Noether-Str. 2, 80992 München

<sup>4</sup> Hydroisotop GmbH, Woelkestraße 9, 85301 Schweitenkirchen

**Keywords:** Geothermie, Süddeutsches Molassebecken, Calcit-Scaling, Inhibitor, biologischer Abbau

## Kurzfassung

Obwohl die Fluide des Malm-Aquifers im südlichen Molassebecken eine geringe Mineralisierung aufweisen, führen Calcit-Ablagerungen (Scaling) zu einer erheblichen Verminderung der Effizienz geothermischer Anlagen sowie zu aufwändigen Wartungsarbeiten. Die Zugabe des biologisch abbaubaren Scaling-Inhibitors NC 47.1B hat sich sowohl an der Geothermieanlage in Unterhaching (Zugabe seit 2017) als auch an den Anlagen in Dürrnhaar (Zugabe seit 2021) und Kirchstockach (Zugabe seit 2023) als wirksame Gegenmaßnahme erwiesen. Detaillierte Untersuchungen in Dürrnhaar belegen, dass der biologische Abbau des Inhibitors *in situ* sowohl über die Verringerung seiner Konzentration als auch über die Abnahme des Elektronenakzeptors Sulfat und die Zunahme von Abbauprodukten nachgewiesen werden kann. Neben der Abnahme der Inhibitorkonzentration nach dem Wärmeentzug weist auch die sich mit der Zugabe des Inhibitors ändernde Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose auf einen Abbau des Inhibitors bereits in der Obertageanlage der drei Standorte hin. Stoffbilanzen im Rahmen eines detaillierten Monitorings an der Anlage in Dürrnhaar belegen einen Abbau von 65 % bis 100 % (Abbau unter Nachweisgrenze).

## 1. Einleitung

Der Betrieb geothermischer Anlagen kann durch mineralische Ablagerungen beeinträchtigt werden. Ausfällungen und Ablagerungen von Mineralien aus der flüssigen Phase in einer Anlage werden als Scaling oder Fouling bezeichnet. Solche Ablagerungen können zu festen Krusten in Rohrleitungen und Wärmetauschern führen und eine Verengung des Rohrdurchmessers sowie eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit zur Folge haben. Somit verschlechtert sich der Wärmeübergang in den Wärmetauschern und Druckverluste entstehen. Im Norddeutschen Becken wurde zudem eine Abnahme der Injektivität in der kalten Injektionsbohrung beobachtet (Würdemann *et al.*, 2016). Im Molassebecken kommt es in den untersuchten Systemen zu Ablagerungen von Calciumcarbonat im Bereich der Steigleitung, an und in der Pumpe, in den obertägigen Rohrtouren, Filtern und Vorkammer der Wärmetauscher (Wanner *et al.*, 2017, Köhl, Elsner und Baumann, 2020). Die Lebensdauer der Förderpumpen verringert sich, die Instandsetzung der mit Scalings belegten Pumpen ist wesentlich aufwändiger und es werden kostenintensive Reinigungen von

Pumpensträngen und Bohrungen erforderlich. Diese unerwünschten Effekte verhindern einen geregelten Anlagenbetrieb und erhöhen die Stillstandszeiten und Betriebskosten.

Scaling kann durch verschiedene Prozesse verursacht werden. Neben Partikelablagerungen und Kristallisation infolge von Änderungen des chemischen Gleichgewichtes, können auch chemisches und biologisches Fouling eine entscheidende Rolle spielen. Partikelablagerungen sind auf feste Bestandteile in einem Fluid zurückzuführen, die sich in Suspension befinden. Diese Partikel sammeln sich in Bereichen geringer Strömungsgeschwindigkeiten oder fallen durch Sedimentation aus der Fluidphase aus. Kristallisation beschreibt die Ausfällung von übersättigten Salzen wie Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) aus einer flüssigen Phase durch Änderung von Parametern, die das Lösungsgleichgewicht beeinflussen. In geothermischen Anlagen betrifft dies vor allem Druck- und Temperaturänderungen während der Förderung, die das chemische Gleichgewicht des Geothermalwassers stören. Die häufigsten Formen von Scaling im Süddeutschen Molassebecken, die im Betrieb von Geothermieanlagen auftreten, sind Ablagerungen durch Kristallisation in Form von Calciumcarbonat (Wanner *et al.*, 2017, Eichinger und Hartog, 2016, Baumann *et al.*, 2017, Köhl, Elsner und Baumann, 2020).

Eine Maßnahme um die Bildung von Scales zu verhindern oder zu reduzieren, ist der Einsatz von Scaling-Inhibitoren. Diese Inhibitoren verhindern über verschiedene Wirkmechanismen die Bildung von Kristallkeimen. Eine Voraussetzung für die Genehmigung des Einsatzes von Scaling-Inhibitoren im Molassebecken ist aus Gründen des vorsorgenden Grundwasserschutzes die biologische und/oder thermische Abbaubarkeit der Inhibitoren. Ein organischer Scaling-Inhibitor ist eine potentielle Kohlenstoffquelle für Mikroorganismen und könnte daher unter günstigen Bedingungen in Bezug auf die Temperatur durch verschiedene Bakterien und Archaeen abgebaut werden. Der Einsatz des Scaling-Inhibitors der Firma Niederrhein Chemie GmbH wird an drei Anlagen im Molassebecken erprobt (siehe auch Broda *et al.*, 2024). Er besteht aus einem Polysaccharid-Gerüst (Kammpolymer) mit Seitenketten aus Polycarboxylaten und trägt die Handelsbezeichnung NC 47.1B.

Effektive Anpassungsmechanismen wie z.B. die Bildung von Biofilmen sorgen dafür, dass Mikroorganismen auch in Habitaten vorkommen können, in denen Substrate und Nährstoffe nur in geringer Konzentration verfügbar sind. Zudem können sich Biofilme auch in Habitaten bilden in denen physikalische oder chemische Extreme wie hohe Temperaturen und/oder hohe Salinitäten herrschen (Rothschild und Mancinelli, 2001, Rampelotto, 2010, Würdemann *et al.* 2016, Kleyböcker *et al.*, 2017, Bregnard *et al.*, 2023). Unter sauerstofffreien (anaeroben) Bedingungen, wie in den tiefen Schichten, in die die Bohrungen einer Geothermieanlage reichen, werden organische Substanzen hydrolysiert und durch anaerobe Fermentation und anaerobe Atmung abgebaut. Diese Stoffwechselprozesse dienen den Mikroorganismen dazu, Energie für eine Vermehrung zu gewinnen. Die dabei ablaufenden Reaktionen sind Redoxreaktionen, bei denen Elektronen von einem Elektronendonator auf einen Elektronenakzeptor übertragen werden. Elektronenakzeptoren sind z.B. Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Elektronendonoren sind beispielsweise organische Kohlenstoffverbindungen oder Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ). Ist die Verfügbarkeit externer Elektronenakzeptoren stark limitiert, kann ein Abbau organischer Verbindungen mittels anaerober Fermentation erfolgen. Einige Reaktionen sind energetisch so ungünstig, dass sie nur ablaufen können, wenn andere Mikroorganismen in räumlicher Nähe das Reaktionsprodukt aufnehmen und so die Konzentration von z.B. Wasserstoff sehr niedrig halten. Es können sich komplexe Biozönosen (Lebensgemeinschaften) in Biofilmen ausbilden, in denen diverse Bacteria und Archaea zusammenleben und in der Struktur eines Biofilms nicht nur von der Syntrophie profitieren, sondern

auch vor mechanischem Stress oder toxischen Stoffen wie z.B. Bioziden oder Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) geschützt sind.

Die langfristige Zugabe eines biologisch abbaubaren, organischen Scaling-Inhibitors könnte daher sowohl die Aktivität als auch die Zusammensetzung der Biozönose im Aquifer und der Anlage verändern und damit u.U. unerwünschte Nebeneffekte wie eine Zunahme der Korrosion (durch Methanogene oder Sulfatreduzierer, SRB) und eine Veränderung der Injektivität bewirken.

Der Einsatz des Inhibitors NC 47.1B an den Anlagen Unterhaching, Dürrnhaar und Kirchstockach wurde durch ein geochemisches und molekularbiologisches Monitoring begleitet. In Unterhaching wurden hierfür an drei Stellen Thermalwasserproben über einen Zeitraum von 40 Monaten entnommen. Die Änderung der Biozönose wurde mit Hilfe von Mikrobiom-Analysen charakterisiert und das Vorkommen relevanter Mikroorganismen bzw. verschiedener stoffwechselphysiologischer Gruppen quantifiziert. Darüber hinaus wurde am Standort Dürrnhaar seit Juni 2019 eine Bypass-Anlage über 5 Jahre betrieben. Der Bypass erhielt Thermalwasser vom Primärkreislauf der Geothermieanlage und teilte es in zwei Ströme. Neben den beiden Strängen mit eigenen Wärmetauschern für vergleichende Experimente verfügte der Bypass auch über Behälter mit Aufhängungen für Stahlcoupons, die als Aufwuchsflächen für Biofilm dienten. Dadurch konnte neben den Veränderungen im Thermalwasser auch der Biofilm auf Metalloberflächen beobachtet werden. Zum Zeitpunkt dieser Publikation wird seit 13 Monaten (seit November 2023) auch an der Geothermieanlage Kirchstockach Inhibitor zugegeben. Das Monitoring ist an diesem Standort auf die Entnahme von Wasserproben hinter den Wärmetauschern begrenzt.

Daneben wurden Inhibitor-Abbauversuche mit Wässern von verschiedenen Standorten zum Nachweis der prinzipiellen Abbaubarkeit unter anaeroben Bedingungen durchgeführt.

## **2. Effizienz und Abbaubarkeit des Inhibitors NC 47.1B**

Die Wirksamkeit des Kalkinhibitors NC 47.1B zeigte sich durch die erfolgreiche und dauerhafte Vermeidung von Karbonatausfällungen in den geothermischen Anlagen in Unterhaching, Dürrnhaar und Kirchstockach. Der Wegfall wiederkehrender Reinigungs- und Wartungsarbeiten kann zu erheblichen Kostenersparnissen im jährlich mittleren 6-stelligen Bereich führen. Die Wirtschaftlichkeit der Anlagen wurde durch eine höhere Anlagenverfügbarkeit, eine Reduzierung des durch Scaling bedingten Förderratenrückgangs sowie einen Betrieb der Anlage mit einem niedrigeren Anlagendruck verbessert (Broda *et al.*, 2024). Zudem konnte beispielsweise in Dürrnhaar im Laufe des Anlagenmonitorings die Inhibitorkonzentration von 3 mg/L auf 2,3 mg/L reduziert werden.

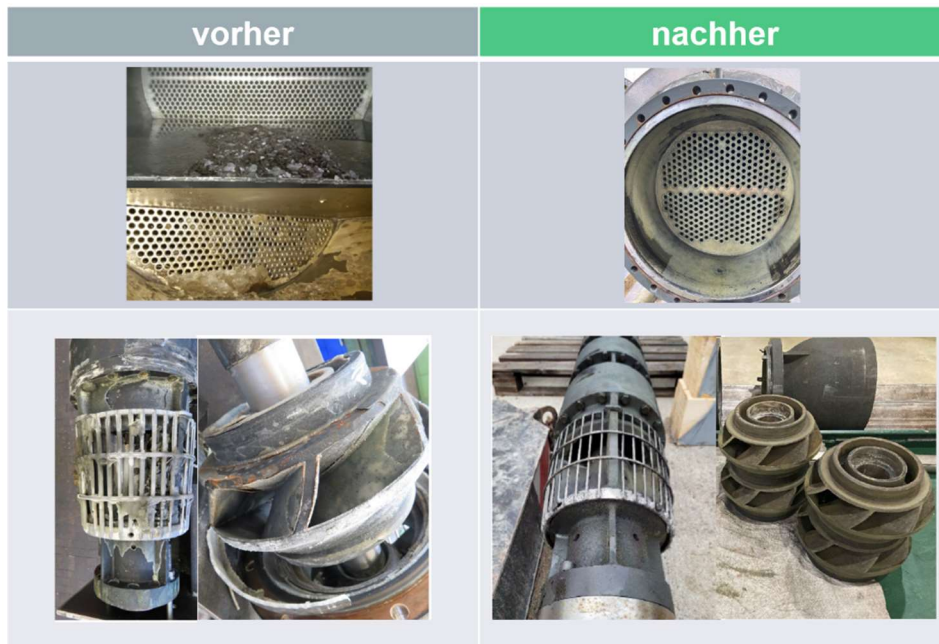


Abb. 1: Eine Wendekammer des Wärmetauschers (oben) und Teile der Tiefenpumpe (unten). Pumpeneinlass sowie Pumpenstufen der Geothermieanlage Dürrnhaar vor (links) und nach 15-monatiger Inhibitorzugabe (rechts). Ein Vergleich der Bilder belegt die gute Wirksamkeit des Inhibitors. Die Komponenten auf der rechten Seite sind frei von Scaling.

Aufgrund der Anforderungen seitens der Genehmigungsbehörden in Bayern beinhaltet der Scaling-Inhibitor NC 47.1B ein auf Basis von Monosacchariden aufgebautes, leicht biologisch abbaubares Kammpolymer. Alle im Inhibitor eingesetzten Stoffe entsprechen der Wassergefährdungsklasse 1 oder günstiger. Als Wirkmechanismus kommt hier v.a. der Oberflächen- und Dispergiereffekt zum Tragen. Dabei werden mikrokristalline Ausfällungen durch das Polyacrylat (Polyelektrolyt) gebunden. Ein Wachstum der Partikel und die damit verbundenen Ausfällungen werden unterbunden. Die Wässer an den untersuchten Anlagen sind vom Na-HCO<sub>3</sub>-Cl bzw. Na-Cl-HCO<sub>3</sub>-Typ. Die Mineralisation liegt zwischen 450 mg/L bis 700 mg/L.

Die in den Inhibitoren enthaltenen unterschiedlichen Polymerverbindungen bauen sich sowohl mikrobiell (unter aeroben und anaeroben Bedingungen) als auch thermisch ab. Beides wurde in Laborversuchen nachgewiesen (Otten *et al.*, 2021, Trumpp, 2022). Zudem wurde der mikrobielle Abbau in den Obertageanlagen Unterhaching, Dürrnhaar und Kirchstockach durch eine Veränderung in der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft angezeigt. Außerdem wurde für den Standort Dürrnhaar im Rahmen eines detaillierten Monitorings neben der Abnahme der Inhibitorkonzentration zusätzlich dazu auch der Verbrauch an Elektronenakzeptor (Sulfatabnahme) sowie die Sulfidbildung für die Bestimmung des biologischen Abbaus herangezogen (siehe Abb. 11).

Weiterhin wurden zum Nachweis des anaeroben biologischen Abbaus des Inhibitors im Labor Experimente bei verschiedenen Temperaturen und Konzentrationen über verschiedene Zeiträume (von 28 bis 440 Tagen) durchgeführt. Aus experimentellen Gründen wurden für die Versuche erheblich höhere Konzentrationen des Inhibitors eingesetzt als in den geothermischen Anlagen, um die beim Abbau gebildeten Zwischenprodukte besser zu erfassen.

Als typisches Beispiel sind die Ergebnisse eines Abbauexperimentes (Dauer 140 Tage) mit Konzentrationen zwischen 120 und 1.200 mg Inhibitor/L dargestellt. In dieser Versuchsreihe wurde neben der Konzentration des Inhibitors und seiner Abbauprodukte auch der DOC-Gehalt bestimmt (Abbildung 2), um eine Stoffbilanz für Kohlenstoff zu erstellen. In allen Ansätzen lag die Inhibitorkonzentration nach 140 Tagen nur noch bei 0,4 bis 1 % der Ausgangskonzentration. Die

Kohlenstoffbilanz zeigt, dass nach 140 Tagen Inkubation der Inhibitor weitgehend zu Acetat (Anteil am DOC = 55 – 92 %) und Formiat (Anteil am DOC = 0 – 40 %) abgebaut war. Zudem waren 11 bis 36 % des Kohlenstoffs im Inhibitor bereits in Methan umgewandelt.

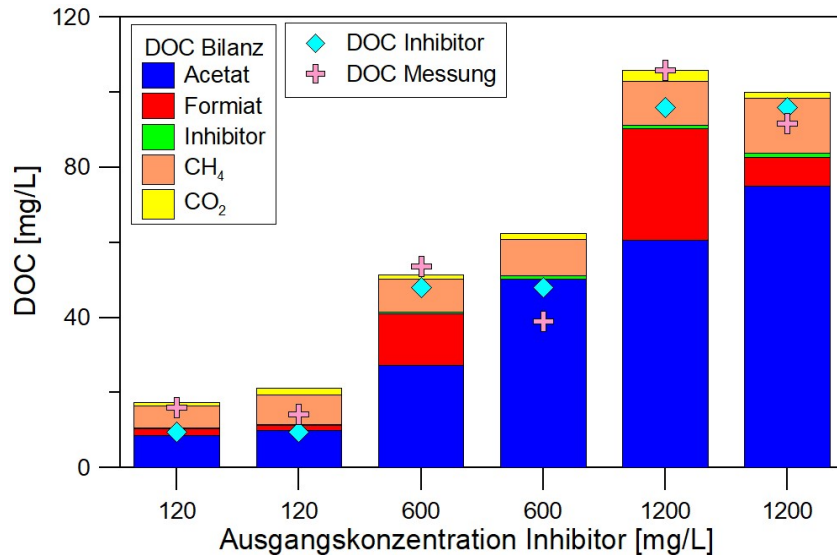


Abb. 2: Konzentration des Inhibitors und der Abbauprodukte nach 140 Tagen Inkubation. Die Probenbezeichnung (120-1200) gibt die Ausgangskonzentration des Inhibitors in mg/L an. Die Summe der Messwerte von Acetat, Formiat, Inhibitor und der Gase CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> sind dem berechneten DOC aus der Zugabe des Inhibitors (◆) und dem nach der Inkubation bestimmten DOC (+) gegenübergestellt.

Weiterhin wurde der mikrobielle Abbau des Inhibitors bei Temperaturen von 40 °C, 60 °C und 80 °C untersucht. In allen mit aktivem Biofilm versetzten Ansätzen nahm die Inhibitorkonzentration ab (Abbildung 3). Korrespondierend dazu bildeten sich die Abbauprodukte Acetat, Formiat und CO<sub>2</sub>. Außerdem fand in den Ansätzen bei 40 °C und 60 °C ein Verbrauch von Wasserstoff und eine Bildung von Methan statt. Dagegen bildete sich bei 80 °C kein Methan. Auffällig war, dass bei 80 °C die Konzentration des Inhibitors sofort nach Start des Versuchs abnahm. Dies deutet darauf hin, dass bei 80 °C der biologische Abbau durch thermischen Zerfall beschleunigt wird. Im Ansatz ohne Biofilmzugabe nahm die Konzentration erst nach 13 Tagen Inkubation ab. In Ansätzen ohne inokulierten Coupon setzte der Abbau deutlich langsamer ein, auch nach 30 Tagen war noch etwa 90 % der Ausgangskonzentration des Inhibitors nachweisbar. Dies weist auf die Bedeutung des biologischen Abbaus durch Biofilme hin.

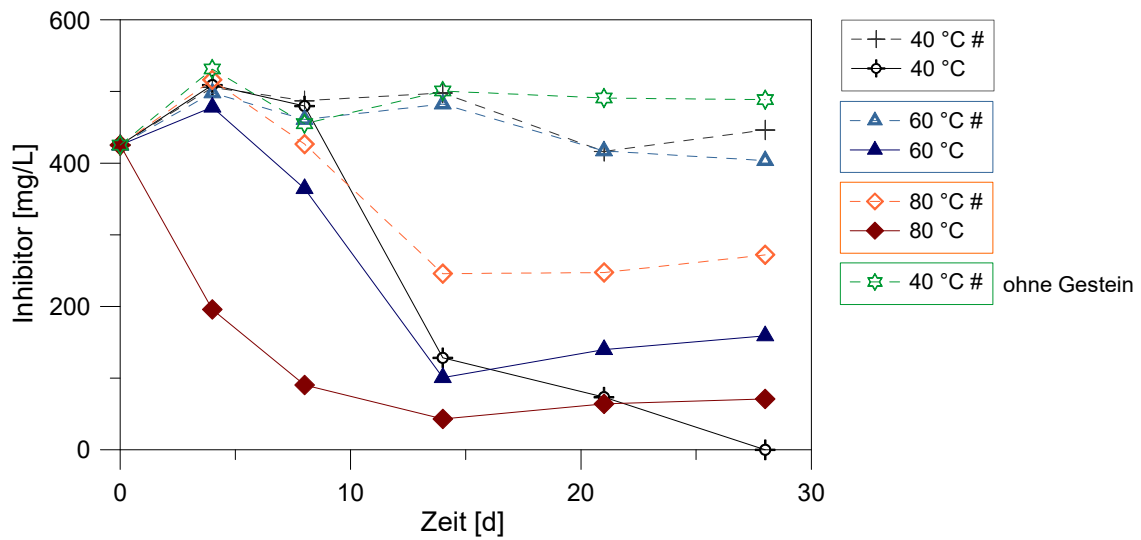


Abb. 3: Abnahme der Inhibitorkonzentration bei unterschiedlichen Temperaturen über 28 Tage. Gezeigt sind die Mittelwerte aus zwei Parallelansätzen. Mit # markierte Ansätze enthielten keinen Coupon und wurden nicht zusätzlich mit Biofilm angeimpft. Nach 175 Tagen war der Inhibitor in keinem Ansatz mehr nachweisbar (nicht gezeigt).

### 3. Monitoring des Inhibitoreinsatzes an den Geothermieranlagen

Die Inhibitorzugabe in den drei Anlagen wird durch ein umfassendes hydrochemisches Monitoring begleitet, das neben der Bestimmung von Anionen und Kationen auch den DOC sowie die Inhibitorkonzentration beinhaltet. In Abbildung 4 sind die im Thermalwasser der Anlage Dürrnhaar gemessenen Magnesiumkonzentrationen gegen die Calciumkonzentration aufgetragen, um die Wirksamkeit der Inhibitorzugabe obertage mit der untertage zu vergleichen.

Die höheren Calciumgehalte im Zuge der untertägigen Dosierung, weisen darauf hin, dass Karbonatausfällungen an den untertägigen Installationen vermieden werden. Die Effizienz des Inhibitors wurde durch die Injektion unterhalb der Förderpumpe erhöht. Kurze Ausfälle bei der Inhibitorzugabe untertage führten nicht zu einer verringerten Calciumkonzentration (Abbildung 4).

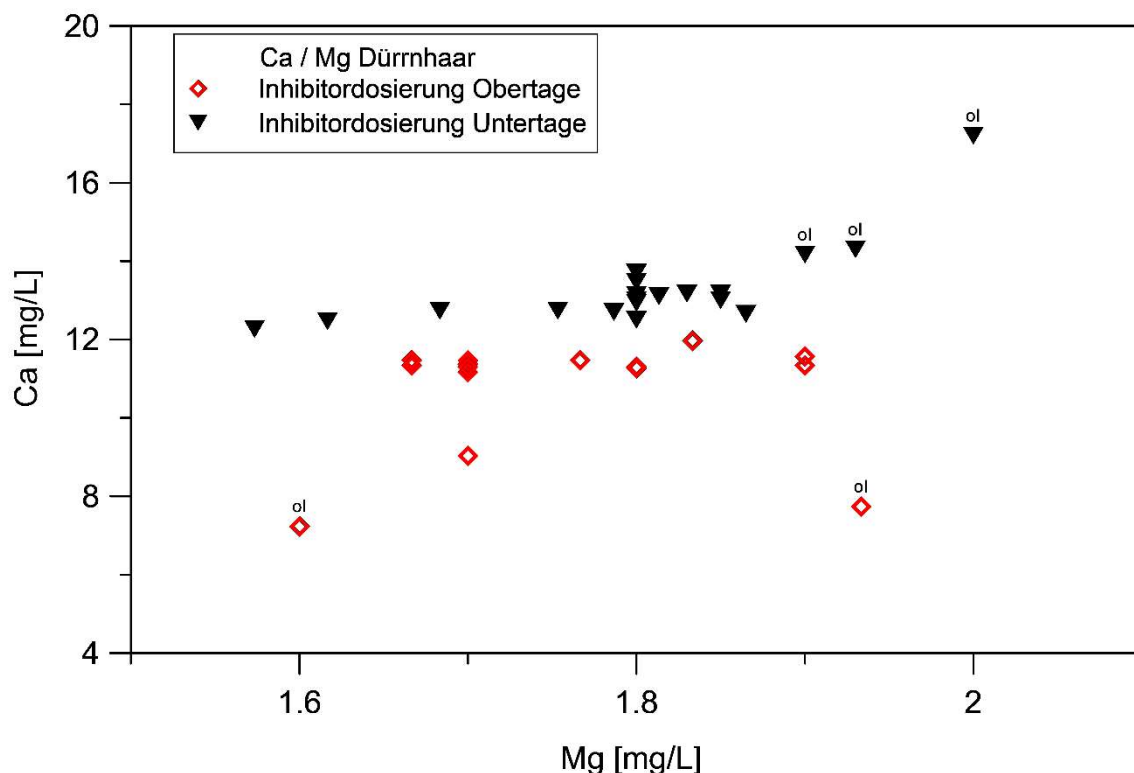


Abb. 4: Konzentration von Calcium und Magnesium im Fluid der Förderbohrung der Geothermieranlage Dürrnhaar. In rot sind die Konzentrationen während der Obertage-Dosierung und in schwarz während der Untertage-Dosierung dargestellt. Die Beschriftung „ol“ kennzeichnet Probenahmen bei abgeschalteter Dosierung (ohne Inhibitor).

Die Zugabemenge des Inhibitors wird online gemessen und kann über die Bestimmung der DOC- und Inhibitorkonzentration überwacht werden.

Die Zusammensetzung der gelösten Gase (größtenteils  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  und  $\text{CH}_4$ ), des pH-Werts sowie der gelösten Hauptionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Cl}^-$ ) wurde durch die Inhibitorzugabe nicht beeinflusst.

### 3.1 Geothermieranlage Unterhaching

In der Geothermieranlage Unterhaching wird ein Na-Cl-HCO<sub>3</sub>-Typ Thermalwasser mit einer sp. el. Leitfähigkeit von 1.100 µS/cm mit einer Temperatur von 123 °C aus 3.350 m Tiefe aus dem Malm-Aquifer gefördert. Die Mineralisierung liegt bei 696 mg/L, der Calciumgehalt beträgt 31,6 mg/L. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde sowohl Wärme in das örtliche Fernwärmenetz eingespeist als auch Strom erzeugt. Nach der Wärmeextraktion im Plattenwärmetauscher (PN Stelle Kraftwerksausgang) wird das Thermalwasser über eine 3,6 km lange Thermalwassertrasse zur Injektionsbohrung geleitet. Seit August 2017 wird der Inhibitor NC 47.1B in der Anlage obertägig zugegeben. Über einen Zeitraum von 40 Monaten nach Beginn der Dosierung wurde die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft sowie die Abundanz wichtiger Gruppen im Fluid der Förderbohrung, des Kraftwerksausgangs sowie der Injektionsbohrung bestimmt.

Die Abundanz der Bacteria in der Förderbohrung blieb über den gesamten Zeitraum sehr niedrig bei  $3 \times 10^5$  bis  $1 \times 10^7$  Kopien/L (Abbildung 5) und lag z.T. unterhalb der Nachweisgrenze. Am Kraftwerksausgang (nach Wärmeextraktion) und an der Injektionsbohrung stieg dagegen die Abundanz der Bacteria an. Zu Beginn des Monitorings lag sie bei  $10^5$  Kopien/L und nach drei Jahren Inhibitorzugabe bei  $10^{12}$  Kopien/L am Kraftwerksausgang. Dies entspricht einem Anstieg um etwa sieben Größenordnungen.

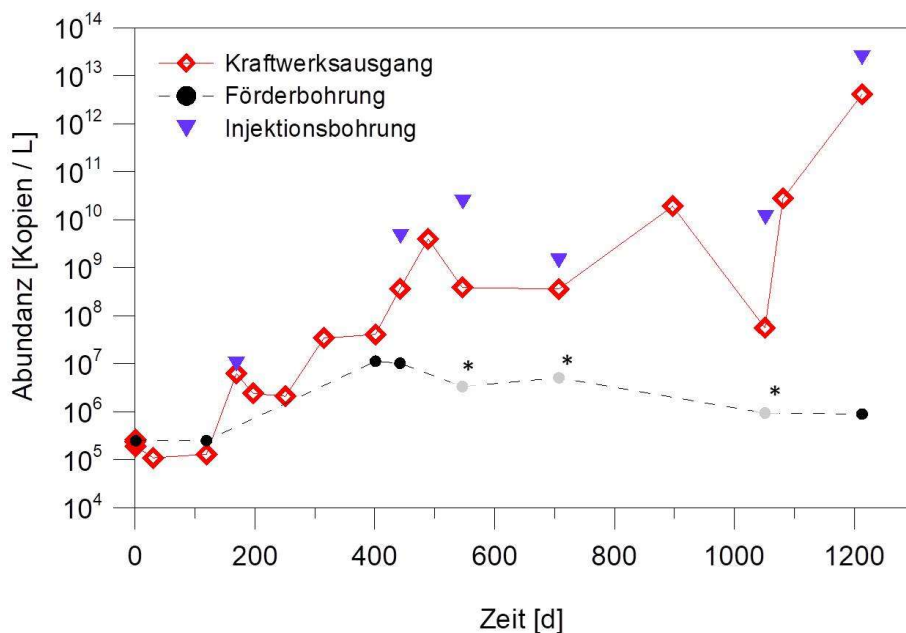


Abb. 5: Quantifizierung der Bacteria (16S rRNA) im Fluid am Kraftwerksausgang (nach dem Wärmetauscher), an der Förderbohrung und an der Injektionsbohrung der Geothermieranlage Unterhaching. Die grau unterlegten und mit \* markierten Werte liegen unter der für diese Probe ermittelten Nachweisgrenze (hier: Blindwert aus der Extraktionskontrolle).

Jahreszeitliche Schwankungen des Wärme- und Strombedarfs und die damit verbundene unterschiedliche Fluidtemperatur nach dem Wärmeentzug (Kraftwerksausgang) beeinflussten ebenfalls die Abundanz der Bacteria. Niedrigere Fluidtemperaturen hatten tendenziell höhere Abundanzen zur Folge.



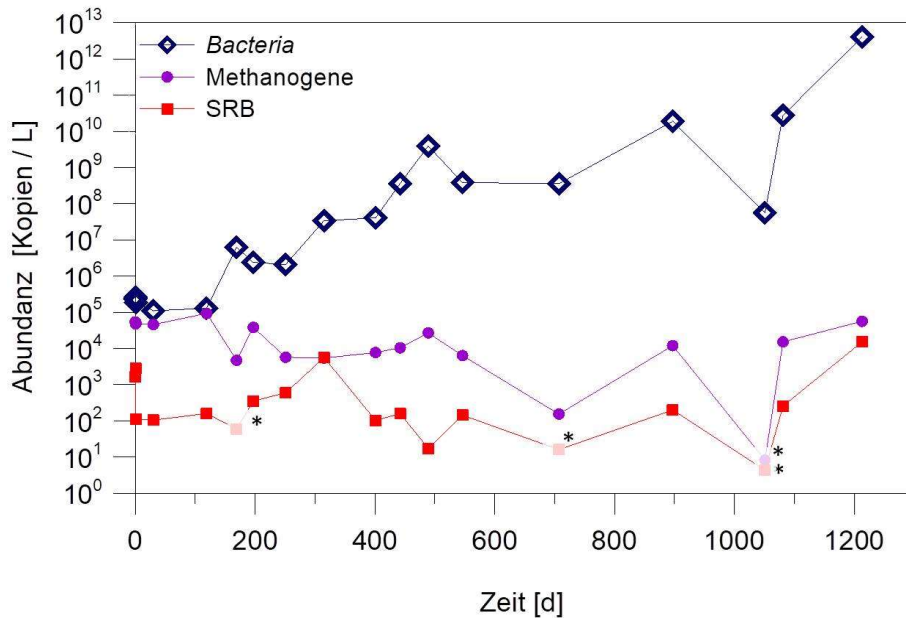


Abb. 6: Quantifizierung der Bacteria (16S rRNA), methanogenen Archaea (16S rRNA) und Sulfatreduzierer (dsrA) im Fluid des Kraftwerksausgangs (nach dem Wärmetauscher) der Geothermieanlage Unterhaching. Die grau unterlegten und mit \* markierten Werte liegen unter der für diese Probe ermittelten Nachweisgrenze (hier: Blindwert aus der Extraktionskontrolle).

Die Abundanz der Sulfatreduzierer und der Methanogenen blieb am Kraftwerksausgang im Gegensatz zur Abundanz der Bacteria in etwa gleich (Methanogene:  $10^3$  bis  $10^4$  Kopien/L, SRB:  $10^1$  bis  $10^4$  Kopien/L, Abbildung 6).

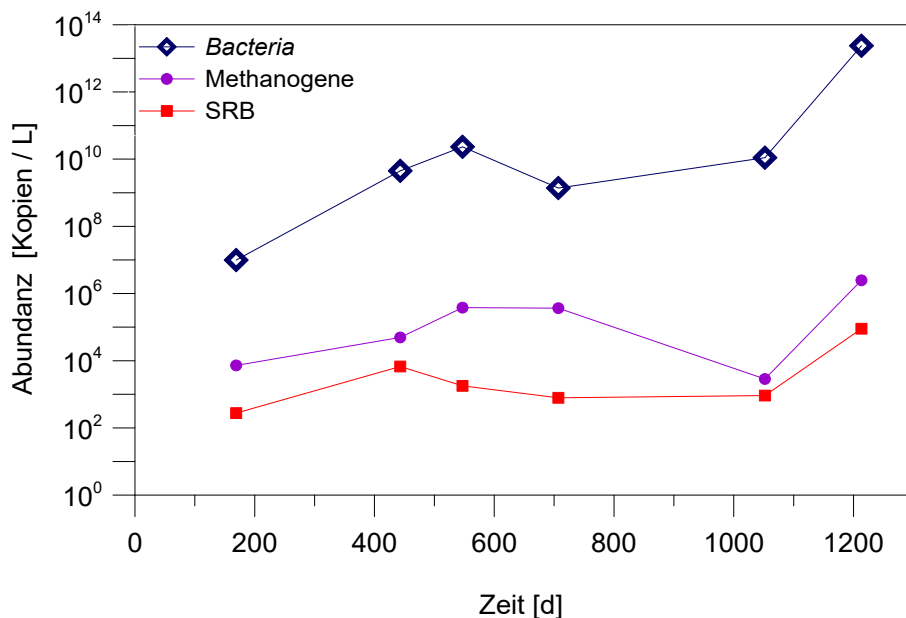


Abb. 7: Quantifizierung der Bacteria (16S rRNA), methanogenen Archaea (16S rRNA) und Sulfatreduzierer (dsrA) im Fluid der Injektionsbohrung der Geothermieanlage Unterhaching.

Auch an der Injektionsbohrung stieg die Abundanz der Bacteria, während die Abundanz der Methanogenen und Sulfatreduzierer sich nicht wesentlich änderte (Abbildung 7). Die Ergebnisse der quantitativen Analysen zeigen, dass die Bacteria und hier vermutlich vor allem die Fermentierer von der Inhibitorzugabe profitieren und sich daher im Vergleich zu den SRB und Methanogenen stärker

vermehrten. Vermutlich war die Abundanz der SRB aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Sulfat (Konzentration 27 mg/L) limitiert. Die erforderliche Häufigkeit von Wartungsarbeiten (Spülungen mit saurer Lösung zur Entfernung des Scaling) wurde durch die Zugabe des Scaling-Inhibitors erheblich verringert. Da durch diese Wartungsarbeiten auch Biofilme von den Flächen der Anlage gelöst wurden, könnte der verminderte Wartungsbedarf auch die Abundanz der Biozönose in den Biofilmen und im Fluid beeinflussen. Den mikrobiellen Gemeinschaften bleibt mehr Zeit, um komplexe Biofilme zu etablieren.

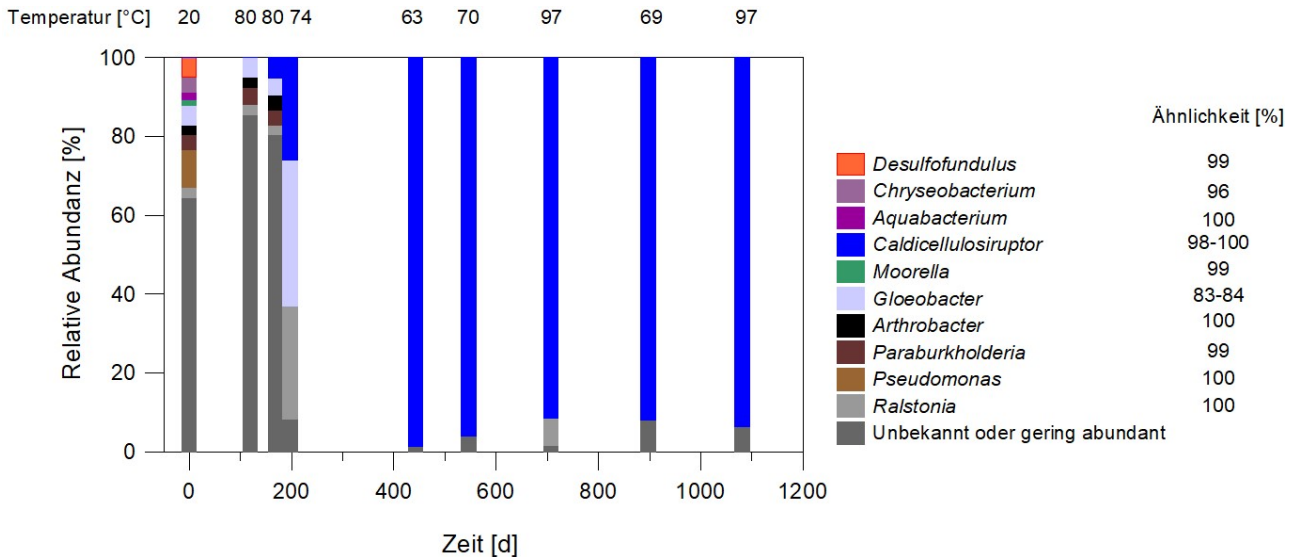


Abb. 8: Charakterisierung der bakteriellen Biozönose (Primer V3V5b) in Fluiden nach dem Wärmetauscher der Anlage in Unterhaching seit Beginn der Zugabe des Inhibitors. Fermentierer sind in grün und blau dargestellt, Sulfatreduzierer in rot. Die Ähnlichkeit beschreibt die Übereinstimmung der in den Proben gefundenen Gensequenzen mit bekannten Proben aus der Datenbank NCBI.

Um ein umfassendes Bild in Bezug auf die Zusammensetzung der Biozönose zu gewinnen, wurden die Fluidproben durch Mikrobiom-Analysen untersucht (Abbildung 8). Vor Zugabe des Inhibitors wurden im Thermalwasser nach dem Wärmetauscher neben bisher unklassifizierten Gattungen auch Vertreter der Gattungen *Pseudomonas*, *Moorella*, *Desulfofundulus*, *Aquabacterium*, *Arthrobacter*, *Paraburkholderia* und *Ralstonia* identifiziert (Abbildung 8, 0 d). *Pseudomonas veronii* kann aromatische Kohlenwasserstoffe wie Toluol und Xylen abbauen (Morales *et al.*, 2016). Zu den Vertretern der Gattung *Moorella* gehören thermophile, acetogene Arten, die u.a. Pentosen, Hexosen, Lactat und H<sub>2</sub> als Elektronendonoren verwenden (Basen *et al.*, 2017). CO<sub>2</sub> und Nitrat dienen u.a. als Elektronenakzeptoren. Weiterhin wurde mit *Desulfofundulus* ein thermophiler, strikt anaerober Sulfatreduzierer gefunden (Watanabe *et al.*, 2018). Vertreter der Gattung *Aquabacterium* sind microaerophil und können Nitrat und Sauerstoff als terminale Elektronenakzeptoren verwenden. Sie verstoffwechseln verschiedene organische Säuren, jedoch keine Kohlenhydrate (Kalmbach *et al.*, 1999). Bei anderen Gattungen ist aufgrund der bisher bekannten Eigenschaften der Vertreter unklar, welche Rolle sie in der mikrobiellen Gemeinschaft im Fluid spielen. Z.B. wurden Vertreter der *Paraburkholderia* aus Wasser und Bodenproben isoliert oder stehen in Verbindung mit Pflanzen (z.B. Leguminosen-Knöllchenbildner) (Dobritsana und Samadpour, 2016). Vertreter der Gattung *Arthrobacter* sind eher kälteliebend (Temperaturoptimum 10-20 °C) und strikt aerob (Busse, 2016). Vertreter von *Ralstonia* sind bekannt als häufige Verunreinigung in molekularbiologisch genutzten Reagenzien und könnten daher auch eine Kontamination darstellen (Salter *et al.*, 2014). Der Nachweis von Fermentierern korrespondiert mit einem Acetat-Gehalt im Thermalwasser von 6 bis 8 mg/L.

Unabhängig von der Anlagentemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme dominierten nach etwa einem Jahr Inhibitorzugabe Vertreter der Gattung *Caldicellulosiruptor* die Biozönose am Kraftwerksausgang und an der Injektionsbohrung (Abbildung 8). *Caldicellulosiruptor* wurde aus heißen Quellen verschiedener Standorte weltweit isoliert (Lee *et al.*, 2020). Vertreter der Gattung können einfache und komplexe Kohlenhydrate bei einem Temperaturoptimum von 65 °C bis 78 °C zu Acetat, Lactat, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> umsetzen (Rainey *et al.*, 1994, Bredholt *et al.*, 1999; Blumer-Schuetz *et al.*, 2014).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mikrobielle Diversität in den Fluidproben, die nach dem Wärmetauscher entnommen wurden, mit der Zeit abnahm. Die Dominanz von Vertretern der Gattung *Caldicellulosiruptor* nahm mit der Dauer der Inhibitorzugabe erheblich auf bis zu 98 % relativer Abundanz zu. Eine Änderung der Zusammensetzung der Biozönose und ein Verlust an Diversität wurde abhängig vom Anzuchtsubstrat und bei Erhöhung der Temperatur auch in Anreicherungskulturen aus dem Yellowstone Nationalpark (Obsidian Pool) beobachtet (Vishnivetskaya *et al.*, 2015). Mit kristalliner Cellulose als Substrat dominierte *Caldicellulosiruptor* bei 80 °C, mit Xylan andere Gattungen. Bei niedrigeren Temperaturen von 55 °C war *Caloramator* vorherrschend, bei 75 °C bis 80 °C *Caldicellulosiruptor* (Vishnivetskaya *et al.*, 2015).

Der Eintrag einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle in Form des Inhibitors in das Thermalwasser verursachte am Standort Unterhaching signifikante Veränderungen der Biozönose. Der DOC des Thermalwassers liegt im Mittel bei 5 mg/L (ohne Inhibitor) und wird natürlicherweise von u.a. Mineralölkohlenwasserstoffen wie Alkanen, Naphthenen und Aromaten bestimmt. Die Inhibitorzugabe erhöht den natürlichen DOC des Thermalwassers um 0,5 mg/L, also um etwa 10 %. Demnach ist es sehr wahrscheinlich, dass die Zugabe einer gut verwertbaren organischen C-Quelle (Inhibitor) ursächlich für die beobachtete Veränderung der Biozönose war. Diese Hypothese wird auch dadurch gestützt, dass sich insbesondere die Abundanz der Bacteria mit dem dominanten Vertreter der Gattung *Caldicellulosiruptor* erhöhte, während die Abundanz von Sulfatreduzierern und Methanogenen weitgehend konstant blieb. Hätte die infolge der Inhibitorzugabe erheblich verringerte Zahl von Wartungsarbeiten (Säuerungen) einen wesentlichen Einfluss auf die Abundanz der Mikroorganismen im Fluid gehabt, hätte auch eine Zunahme bei SRB und Methanogenen beobachtet werden müssen. Diese Interpretation wird durch die im folgenden beschriebenen Untersuchungen in Dürrnhaar weiter erhärtet.

### 3.2 Geothermieranlage Dürrnhaar

In der Geothermieranlage Dürrnhaar wird ein Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-Typ Thermalwasser mit einer sp. el. Leitfähigkeit von 630 µS/cm mit einer Temperatur von 138 °C aus 3.926 m Tiefe (TVD) aus dem Malm-Aquifer gefördert. Die Mineralisierung beträgt 443 mg/L, der Calciumgehalt 11,1 mg/L. Nach der Wärmeauskopplung zur Stromerzeugung wird das Thermalwasser in der Injektionsbohrung eingeleitet. Seit Februar 2021 (Tag 0) wurde der Inhibitor NC 47.1B in der Anlage in Dürrnhaar eingesetzt, zunächst erfolgte die Zugabe obertägig und seit September 2021 (Tag 212) unterhalb der Tauchkreiselpumpe.

Die Zugabemenge des Inhibitors wird online gemessen und kann über die Bestimmung der DOC- und Inhibitorkonzentration überwacht werden.

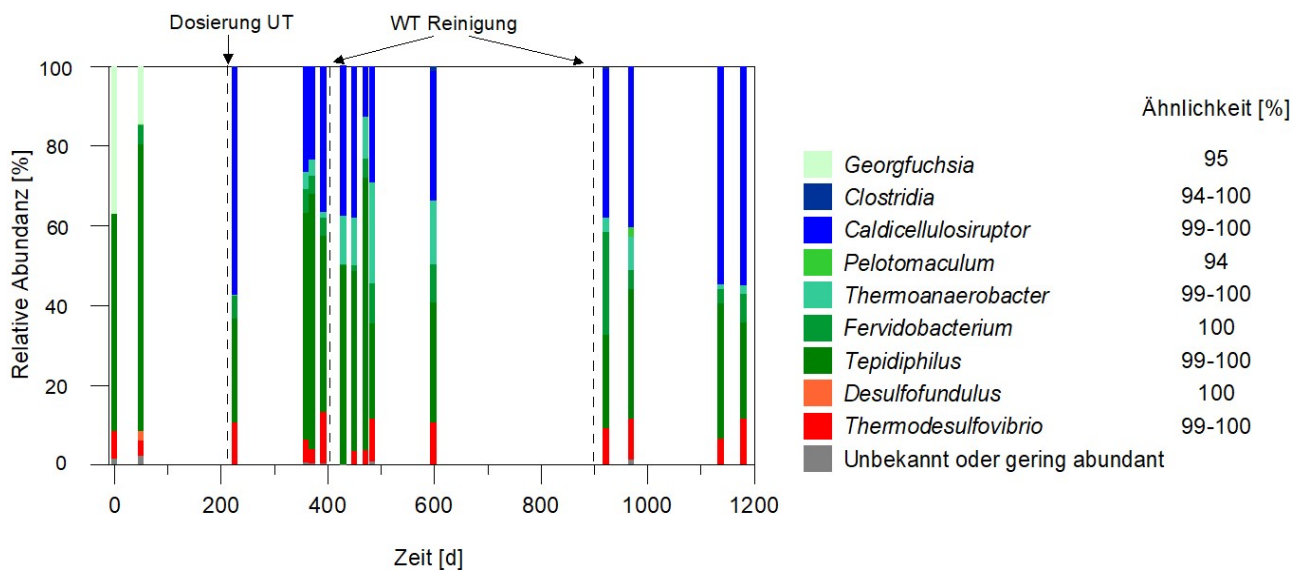


Abb. 9: Charakterisierung der bakteriellen Biozönose (Primer V3V5b) in Fluiden nach dem Wärmetauscher der Anlage in Dürrnhaar vor und nach Beginn der Inhibitorzugabe. Fermentierer sind in grün und blau dargestellt, Sulfatreduzierer in orange und rot, UT = Untertage, WT = Wärmetauscher. Die Ähnlichkeit beschreibt die Übereinstimmung der in den Proben gefundenen Gensequenzen mit bekannten Proben aus der Datenbank NCBI.

Die Charakterisierung der mikrobiellen Biozönose im Fluid der Anlage (Kraftwerksausgang) mittels Mikrobiom-Analyse zeigte vor Zugabe des Inhibitors eine von *Tepidiphilus succinatimandens* dominierte Biozönose (72 % rel. Abundanz, 99-100 % Ähnlichkeit zu bekannter Art) (Abbildung 9). Vertreter der Gattungen *Georgfuchsia* (14 % rel. Abundanz), *Fervidobacterium* (4,7 % rel. Abundanz) und Sulfatreduzierern wie *Desulfofundulus* (2,5 % rel. Abundanz) und *Thermodesulfovibrio* (3,7 % rel. Abundanz) waren in geringerem Maße vorhanden.

Seit Zugabe des Inhibitors ist der Fermentierer *Caldicellulosiruptor* mit relativen Abundanzen von bis zu 55 % im Thermalwasser nachweisbar. Entsprechend haben sich die relativen Abundanzen der anderen Organismen reduziert, v.a. der vorher dominante *Tepidiphilus* ist mit rel. Abundanzen von 24 bis max. 68 % nun zu den meisten Untersuchungszeitpunkten weniger dominant. *Caldicellulosiruptor* kann, wie weiter oben schon geschrieben, bei einem Temperaturoptimum von 65 °C bis 78 °C verschiedene Kohlenhydrate zu Acetat, Lactat, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> verstoffwechseln. *Tepidiphilus succinatimandens* ist ebenfalls thermophil, mit einem Temperaturoptimum um 50–55 °C (Poddar, Lepcha und Das, 2014, Salinas *et al.*, 2004). In Anwesenheit von Nitrat können diese Organismen anaerob leben. Sie sind chemoorganotroph und können organischen Säuren und Aminosäuren als Kohlenstoffquelle nutzen, aber keine Zucker (Whitman *et al.*, 2015). Vermutlich verwertet *Tepidiphilus* die Stoffwechselprodukte von *Caldicellulosiruptor*. Mit der Zugabe des Inhibitors hat sich eine neue Biozönose etabliert, die den Inhibitor verwerten kann.

Obwohl die Sulfatreduzierer eine entscheidende Rolle beim Abbau des Inhibitors spielen, erhöht sich deren Abundanz im Verlauf der Inhibitorzugabe nicht wesentlich. *Thermodesulfovibrio* ist seit der Zugabe des Inhibitors der einzige nachgewiesene Sulfatreduzierer im Thermalwasser (rel. Abundanz 3 bis 13 %), da *Desulfofundulus* nicht mehr gefunden wurde. Vermutlich wird die Abundanz der SRB durch die geringe Verfügbarkeit von Sulfat (4 mg/L) limitiert.

Der Abbau des Inhibitors konnte *in situ* sowohl über die Verringerung seiner Konzentration als auch über die Abnahme des Elektronenakzeptors Sulfat und die Zunahme von Abbauprodukten nachgewiesen werden. Die Inhibitorkonzentration nahm zwischen Förderbohrung und Kraftwerksausgang im Durchschnitt um etwa 65 % ab (Abbildung 10).

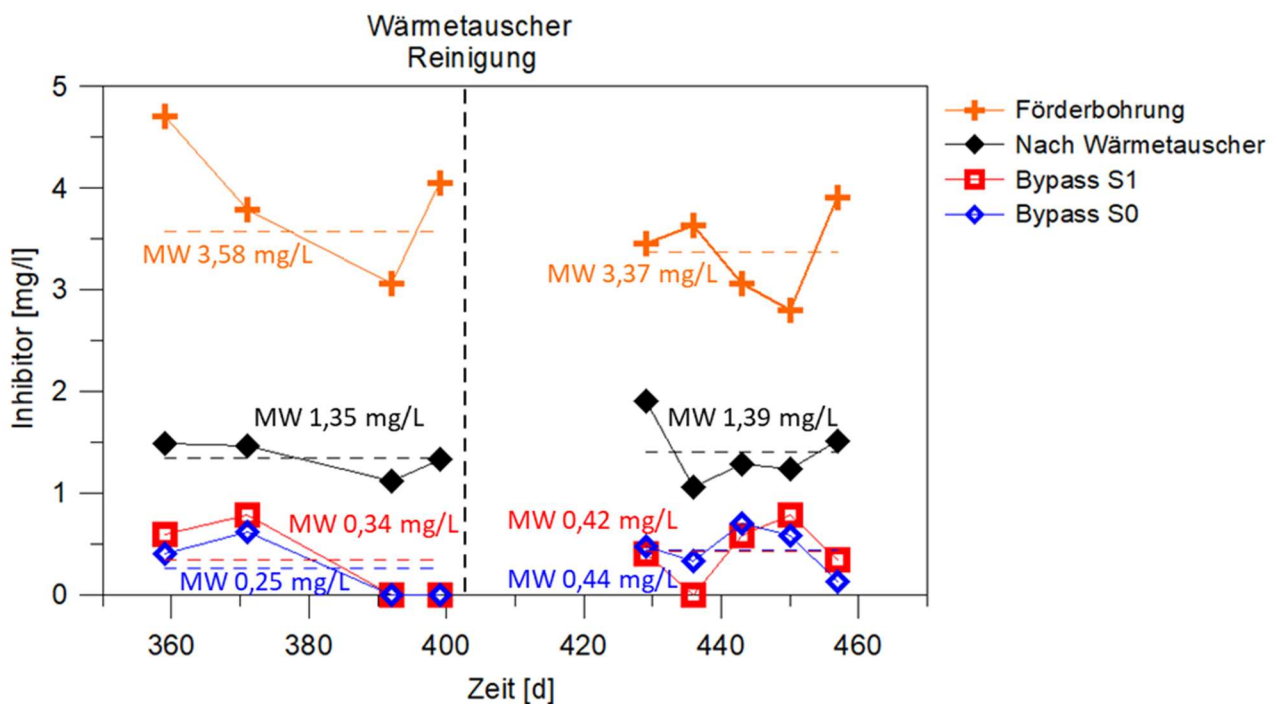


Abb. 10: Abnahme der Inhibitorkonzentration von der Förderbohrung zum Ausgang des Wärmetauschers in der Großtechnik und am Ausgang der zwei Stränge des Bypasses (S0 und S1) in der Geothermieanlage Dürrnhaar.

Im Bypass erhöhte sich der Abbau des Inhibitors infolge der längeren Verweilzeit und der mit 55 °C besonders günstigen Temperatur auf 70 %, z.T. bis unter die Nachweisgrenze. Korrespondierend zur Abnahme des Inhibitors wurde eine Abnahme der Sulfatkonzentration und eine Zunahme der Sulfidkonzentration nachgewiesen. Anhand einer Stoffbilanz kann der Abbau des Inhibitors in der Obertageanlage allein durch Sulfatreduktion erklärt werden (Abbildung 11). Hinzu kommt ein Abbau über die im Thermalwasser detektierten Archaea, deren Abbau wegen der relativ hohen, geogen bedingten Methankonzentration nicht quantifiziert werden kann.

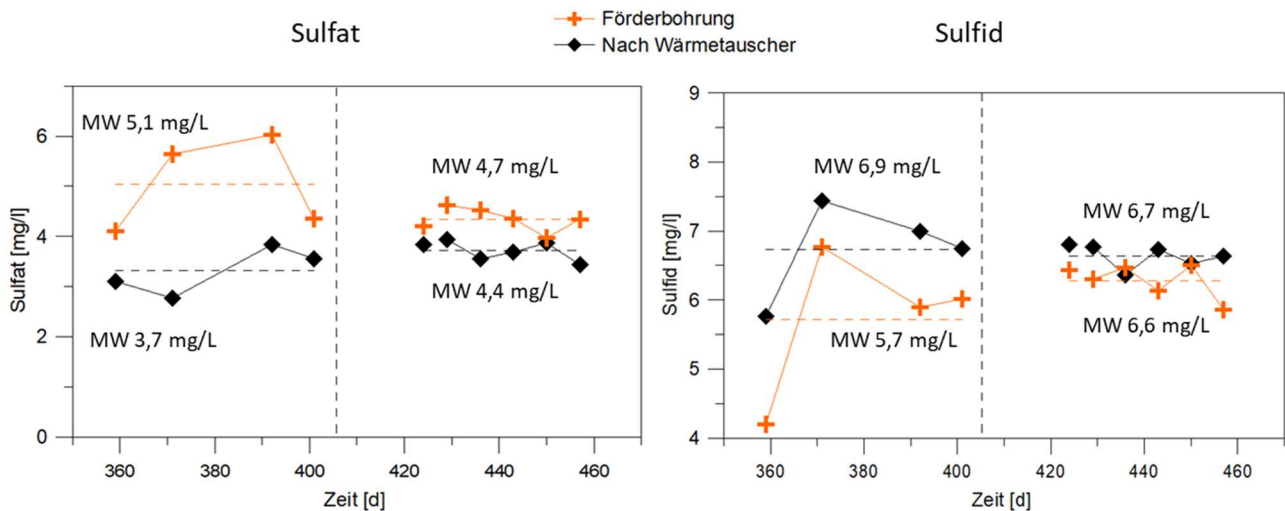


Abb. 11: Konzentrationen von Sulfat (links) und Sulfid (rechts) im Thermalwasser in Dürrnhaar. Orange: Konzentration an der Förderbohrung, schwarz: Konzentration am Kraftwerksausgang. Die gestrichelte vertikale Linie markiert die Reinigung der Wärmetauscher, waagerechte Linien zeigen den Mittelwert der jeweiligen Proben an.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose in den Thermalwasserproben, die nach dem Wärmetauscher entnommen wurden, mit der Inhibitorzugabe änderte. Korrespondierend dazu wurde ein Abbau des Inhibitors z.T. bis unter die Nachweisgrenze beobachtet. Die Dominanz von Vertretern der Gattung *Caldicellulosiruptor* nahm mit der Dauer der Inhibitorzugabe erheblich auf bis zu 55 % relativer Abundanz zu. Dagegen war im Verlauf der Inhibitorzugabe keine Zunahme der SRB zu beobachten. Die Abundanz der SRB lag zwischen 3 und 13 % relativer Abundanz (Mittelwert 7,4 %). Vermutlich wird die Abundanz der SRB auch in Dürrnhaar durch die geringe Verfügbarkeit von Sulfat limitiert.

### 3.3 Geothermieranlage Kirchstockach

In der Geothermieranlage Kirchstockach wird ca. 120 °C heißes Thermalwasser aus 3.882 m Tiefe (TVD) aus dem Malm-Aquifer gefördert. Es handelt sich hierbei ebenfalls um ein Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-Typ Wasser mit einer sp. el. Leitfähigkeit von 720 µS/cm. Die Mineralisation beträgt 520 mg/l, der Calciumgehalt 22 mg/l. Nach der Wärmeauskopplung zur Stromerzeugung und Nutzung im Fernwärmenetz wird das abgekühlte Thermalwasser in der Injektionsbohrung eingeleitet. Seit November 2023 wird der Inhibitor NC 47.1B in der Anlage untertage injiziert.

Vor Beginn der Inhibitorzugabe wurde das Thermalwasser zwei Mal nach den Wärmetauschern beprobt. 17 Monate vor Inhibitorzugabe wurden geringe bakterielle Abundanzen von  $2,5 \times 10^5$  Kopien/L nachgewiesen, einen Monat vor Beginn der Zugabe sogar nur  $1,4 \times 10^4$  Kopien/L. Die Abundanz der Sulfatreduzierer lag bei  $7,8 \times 10^2$  bzw.  $2,0 \times 10^2$  Kopien/L (17 Monate vorher bzw. 1 Monat vorher).

Vier Monate nach Beginn der Inhibitorzugabe zeigte sich ein Anstieg der bakteriellen Abundanz auf  $8,3 \times 10^{10}$  Kopien/L, und die der SRB auf  $3,2 \times 10^4$  Kopien/L. Ein Jahr nach Beginn der Zugabe lag die Abundanz der Bacteria bei  $2,1 \times 10^8$ , die der SRB bei  $5,4 \times 10^5$  Kopien/L. Die Abundanz der Bacteria stieg also seit Beginn der Inhibitorzugabe um drei bis sechs Größenordnungen, die der SRB um zwei bis drei Zehnerpotenzen.

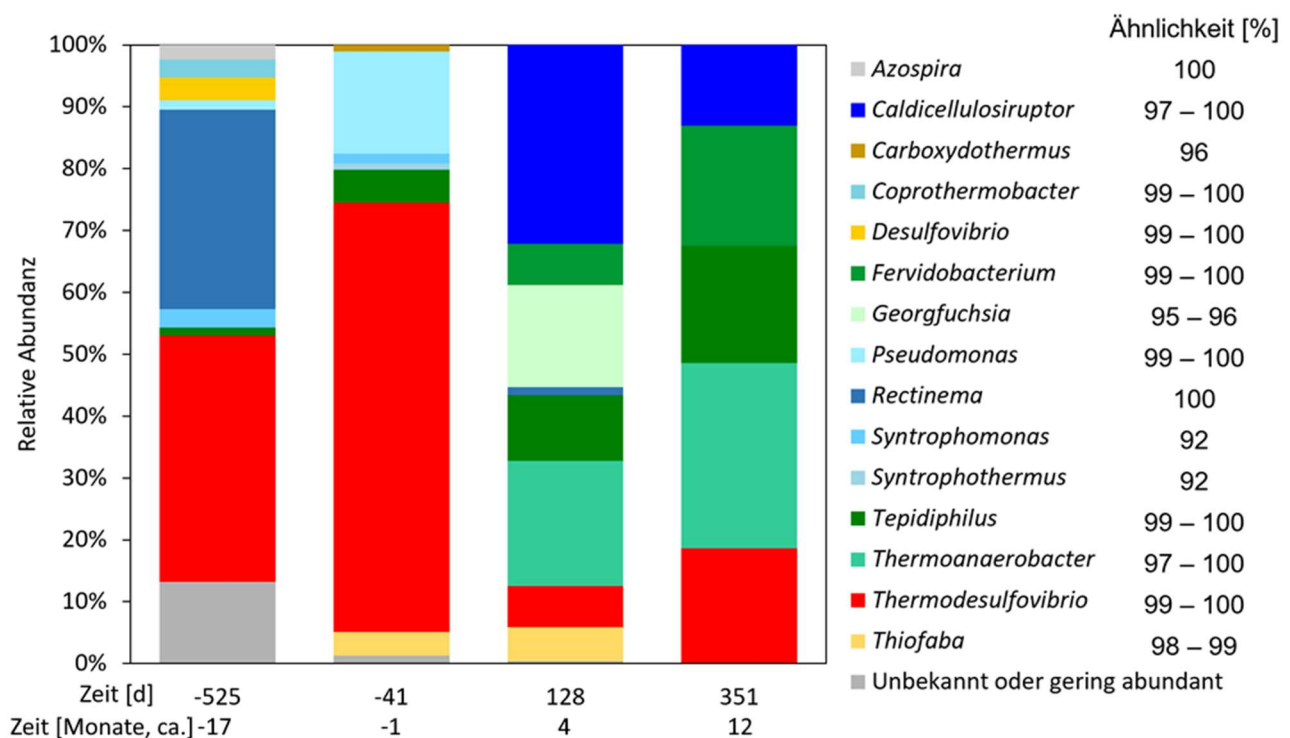


Abb. 12: Charakterisierung der bakteriellen Biozönose (Primer V3V5b) im Thermalwasser nach dem Wärmetauscher der Anlage in Kirchstockach vor und nach Beginn der Inhibitorzugabe. Fermentierer sind in grün und blau dargestellt, Sulfatreduzierer in rot und gelb. Die Ähnlichkeit beschreibt die Übereinstimmung der in den Proben gefundenen Gensequenzen mit bekannten Proben aus der Datenbank NCBI.

Die Zusammensetzung der bakteriellen Biozönose im Thermalwasser des Standortes Kirchstockach wurde vor der Zugabe des Inhibitors (17 Monate bzw. ein Monat vor der Zugabe) und im Verlauf der Zugabe (vier und 12 Monate nach Beginn der Zugabe) mittels Mikrobiom-Analyse charakterisiert (Abbildung 12). Vor Beginn der Inhibitorzugabe wurde die Biozönose von SRB, insbesondere von Vertretern der Gattung *Thermodesulfovibrio* (40 bzw. 69 % rel. Abundanz 17 bzw. 1 Monat vor Zugabe Inhibitor) und *Rectinema* (32 % rel. Abundanz, 17 Monate vor Zugabe Inhibitor), dominiert.

Vertreter der Gattung *Thermodesulfovibrio* sind obligat anaerobe, Sulfat-reduzierende Bakterien, deren Temperaturoptimum zwischen 55 und 60 °C liegt (Sekiguchi *et al.*, 2008). Die hier gefundenen Vertreter der Art *Rectinema cohabitans* (100 % Ähnlichkeit zu bekannten Arten) sind ebenfalls anaerob und wurden in Co-Kultur mit Sulfat-reduzierenden Organismen gefunden. Bis zu 50 °C wurde im Labor ein Wachstum nachgewiesen (Koelschbach *et al.*, 2017).

Nach Zugabe des Inhibitors nahm die Dominanz von Fermentierern (grün und blau in Abbildung 12) erheblich zu. Vertreter der Gattungen *Caldicellulosiruptor* (32 bzw. 13 % rel. Abundanz, 4 bzw. 12 Monate nach Zugabe des Inhibitors), *Thermoanaerobacter* (20 bzw. 30 % rel. Abundanz) und *Tepidiphilus* (11 % bzw. 19 % rel. Abundanz) waren nun dominant. Besonders interessant ist, dass auch an diesem Standort die Gattung *Caldicellulosiruptor* nach Zugabe des Inhibitors erstmals nachgewiesen wurde. Vertreter von *Caldicellulosiruptor* sind dafür bekannt, dass sie auch bei hohen Temperaturen ( $\geq 70$  °C) Kohlenhydrate abbauen (Bing *et al.*, 2023). Weil *Caldicellulosiruptor* auch in Unterhaching und Dürrnhaar nach dem Beginn der Inhibitorzugabe nachgewiesen wurde, kann der Nachweis dieser Gattung als Indikator für einen mikrobiellen Abbau des Inhibitors in den Thermalwässern des Molassebeckens gewertet werden.

Vertreter der Gattung *Thermoanaerobacter* sind ebenfalls Fermentierer, die als Stoffwechselprodukte Acetat, Lactat, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> bilden (Fardeau *et al.*, 2004). Die Art *Tepidiphilus succinatimandens* (früher *Petrobacter succinatimandens*) ist gram-negativ, anaerob, hat ein Temperaturoptimum von 50-55 °C und kann Nitrat reduzieren (Poddar, Lepcha und Das, 2014, Salinas *et al.*, 2004). Trotz der nun höheren relativen Abundanz von fermentierenden Mikroorganismen wurden seit der Zugabe des Inhibitors auch weiterhin Sulfatreduzierer nachgewiesen. *Thermodesulfovibrio* hatte z.B. eine relative Abundanz von 18 % nach einem Jahr Inhibitorzugabe, ähnlich wie am Standort Dürrnhaar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich auch am Standort Kirchstockach die Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose in den Thermalwasserproben mit der Inhibitorzugabe änderte. Nach Beginn der Inhibitorzugabe lag die Dominanz von Vertretern der Gattung *Caldicellulosiruptor* zwischen 13 und 32 %. Korrespondierend dazu verringerte sich die relative Abundanz der SRB und lag zwischen 6 und 18 % relativer Abundanz. Vermutlich wird die Abundanz der SRB auch in Kirchstockach durch die geringe Verfügbarkeit von Sulfat (6 mg/L) limitiert.



## 2.5 Fazit

Obwohl die Fluide des Malm-Aquifers im südlichen Molassebecken eine geringe Mineralisierung aufweisen, führt Scaling in geothermischen Anlagen zu einer erheblichen Verminderung der Effizienz. Seit 2017 hat sich in einem Pilotprojekt am Standort Unterhaching der Einsatz eines biologisch abbaubaren Scaling-Inhibitors als wirksame Lösung bewährt. Im Rahmen des Forschungsprojektes EvA-M 2 wurde der Einsatz des Inhibitors auf zwei weitere Anlagen im Großraum München ausgeweitet: Dürrnhaar seit 2021 und Kirchstockach seit 2023.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich aufgrund der Zugabe des Inhibitors die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften in Folge der Abbauprozesse an allen drei Standorten geändert hat. Detaillierte Untersuchungen in Dürrnhaar belegen, dass der Abbau des Inhibitors *in situ* sowohl über die Verringerung seiner Konzentration als auch über die Abnahme des Elektronenakzeptors Sulfat und die Zunahme von Abbauprodukten nachgewiesen werden kann. Die Konzentration des Inhibitors (3 bis 4 mg/L) nahm zwischen Förderbohrung und Kraftwerksausgang im Durchschnitt um etwa 65 % ab. Anhand einer Stoffbilanz kann der biologische Abbau des Inhibitors in der Obertageanlage allein durch Sulfatreduktion erklärt werden. In einem Bypass erhöhte sich der Abbau des Inhibitors infolge der längeren Verweilzeit und der mit 55 °C besonders günstigen Temperatur auf 70 % bis 100 % (unter Nachweisgrenze) je nach Verweilzeit des Fluids im Bypass.

## Dank

Die Daten für diesen Artikel wurden im Rahmen des Verbundprojektes „Anwendung von umweltfreundlichen Inhibitoren und CO<sub>2</sub> zur Vermeidung von Karbonatausfällungen in der tiefen Geothermie des Bayerischen Molassebeckens“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über den Projektträger PTJ (Förderkennzeichen 03EE4032C) gewonnen.

## Quellenangaben

- BASEN, M. und MÜLLER, V.: "Hot" acetogenesis, *Extremophiles*, 21, (2017), DOI: 10.1007/s00792-016-0873-3.
- BAUMANN, T., BARTELS, J., LAFOGLER, M., WENDEROTH, F.: Assessment of heat mining and hydrogeochemical reactions with data from a former geothermal injection well in the Malm Aquifer, Bavarian Molasse Basin, Germany, *Geothermics*, 66, (2017), DOI: 10.1016/j.geothermics.2016.11.008
- BING, R. G., WILLARD, D. J., CROSBY, J. R., ADAMS, M. W. W., KELLY, R. M.: Whither the genus *Caldicellulosiruptor* and the order Thermoanaerobacterales: phylogeny, taxonomy, ecology, and phenotype, *Frontiers in Microbiology*, 14, (2023), DOI: 10.3389/fmicb.2023.1212538
- BLUMER-SCHUETTE, S. E., BROWN, S. D., SANDER, K. B., BAYER, E. A., KATAEVA, I., ZURAWSKI, J. V., CONWAY, J. M., ADAMS, M. W. W., KELLY, R. M.: Thermophilic lignocellulose deconstruction, *FEMS Microbiology Reviews*, 38, (2014), DOI: 10.1111/1574-6976.12044
- BREDHOLT, S., SONNE-HANSEN, J., NIESLEN, P., MATHRANI, I. M., AHRING, B.: *Caldicellulosiruptor kristjanssonii* sp. nov., a cellulolytic, extremely thermophilic, anaerobic bacterium, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 49, (1999), DOI: 10.1099/00207713-49-3-991
- BREGNARD, D., LEINS, A., CAILLEAU, G., VIETH-HILLEBRAND, A., EICHINGER, F., IANOTTA, J., HOFFMANN, R., UHDE, J., BINDSCHEDLER, S., REGENSPURG, S., JUNIER, P.: Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments, *Geothermal Energy*, 11, (2023), DOI: 10.1186/s40517-023-00269-z
- BRODA, B., KÖHL, B., EICHINGER, F., IANOTTA, J., KUHN, D., WÜRDEMANN, H., OTTEN, C., SCHLEGEL, P., SEIBT, A., TEITZ, S.: Vermeidung von Kalkausfällungen bei Hydrogeothermalen Projekten: Ganzheitliche technisch-ökonomische Machbarkeitsstudie zur Vermeidung von Kalkausfällungen bei hydrogeothermalen Projekten mittlerer Enthalpie im Molassebecken, *EEK Energy*, 1, (2024), DOI: 10.19225/240000
- BUSSE, H.-J.: Review of the taxonomy of the genus *Arthrobacter*, emendation of the genus *Arthrobacter sensu lato*, proposal to reclassify selected species of the genus *Arthrobacter* in the novel genera *Glutamicibacter* gen. nov., *Paeniglutamicibacter* gen. nov., *Pseudoglutamicibacter* gen. nov., *Paenarthrobacter* gen. nov. and *Pseudarthrobacter* gen. nov., and emended description of *Arthrobacter roseus*, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, (2016), DOI: 10.1099/ijsem.0.000702
- DOBRITSANA, A. P. und SAMADPOUR, M.: Transfer of eleven species of the genus *Burkholderia* to the genus *Paraburkholderia* and proposal of *Caballeronia* gen. nov. to accommodate twelve species of the genera *Burkholderia* and *Paraburkholderia*, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, (2016), DOI: 10.1099/ijsem.0.001065
- EICHINGER, F. und HARTOG, N.: Carbonate scalings in deep geothermal systems, in: *Operational issues in Geothermal Energy in Europe*, Chapter: 2.2, Publisher: Coordination Office Geothermal ERA NET, (2016), pp. 57-61
- FARDEAU, M.-L., SALINAS, M. B., L'HARIDON, S., JEANTHON, C., VERHÉ, F., CAYOL, J.-L., PATEL, B. K. C., GARCIA, J.-L., OLLIVIER, B.: Isolation from oil reservoirs of novel thermophilic anaerobes phylogenetically related to *Thermoanaerobacter subterraneus*: reassignment of *T. subterraneus*, *Thermoanaerobacter yonseiensis*, *Thermoanaerobacter tengcongensis* and *Carboxydibrachium pacificum* to *Caldanaerobacter subterraneus* gen. nov., sp. nov., comb. nov. as four novel subspecies, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, (2004), DOI: 10.1099/ijms.0.02711-0
- KALMBACH, S., MANZ, W., WECKE, J., SZEZYK, U.: *Aquabacterium* gen. nov., with description of *Aquabacterium citratiphilum* sp. nov., *Aquabacterium parvum* sp. nov. and *Aquabacterium commune* sp. nov., three in situ dominant bacterial species from the Berlin drinking water system, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 49, (1999), DOI: 10.1099/00207713-49-2-769

- KLEYBÖCKER, A., LIENEN, T., KASINA, M., WESTPHAL, A., TEITZ, S., EICHINGER, F., SEIBT, A., WOLFGRAMM, M., WÜRDEMANN, H.: Effects of heat shocks on biofilm formation and the influence on corrosion and scaling in a geothermal plant in the North German Basin, *Energy Procedia*, 125, (2017), DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.173
- KOELSCHBACH, J. S., MOUTTAKI, H., PICKL, C., HEIPIEPER, H. J., RACHEL, R., LAWSON, P. A., MECKENSTOCK, R.: *Rectinema cohabitans* gen. nov., sp. nov., a rod-shaped spirochaete isolated from an anaerobic naphthalene-degrading enrichment culture, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67, (2017), DOI: 10.1099/ijsem.0.001799
- KÖHL, B., ELSNER, M. und BAUMANN, T.: Hydrochemical and operational parameters driving carbonate scale kinetics at geothermal facilities in the Bavarian Molasse Basin, *Geothermal Energy*, 8, (2020), DOI: 10.1186/s40517-020-00180-x
- LEE, L., CROSBY, J., RUBINSTEIN, G., LAEMTHONG, T., Straub, C., SCHUT, G., KELLY, R.: The biology and biotechnology of the genus *Caldicellulosiruptor*: recent developments in 'Caldi World', *Extremophiles*, 24, (2020), DOI: 10.1007/s00792-019-01116-5.
- MORALES, M., SENTCHILO, V., BERTELLI, C., KOMLJENOVIC, A., KRYUCHKOVA-MOSTACCI, N., BOURDILLOUD, A., et al.: The genome of the toluene-degrading *Pseudomonas veronii* strain 1YdBTEX2 and its differential gene expression in contaminated sand, *PLoS ONE*, 11, (2016), DOI: 10.1371/journal.pone.0165850
- OTTEN, C., DASSLER, B., TEITZ, S., IANOTTA, J., EICHINGER, F., SEIBT, A., KUHN, D., WÜRDEMANN, H.: Interactions between the calcium scaling inhibitor NC47.1 B, geothermal fluids, and microorganisms – results of in situ monitoring in the Bavarian Molasse Basin (Germany) and accompanying laboratory experiments, *Advances in Geosciences*, 54, (2021), DOI: 10.5194/adgeo-54-217-2021
- PODDAR, A., LEPCHA, R. T., DAS, S. K.: Taxonomic study of the genus *Tepidiphilus*: transfer of *Petrobacter succinatimandens* to the genus *Tepidiphilus* as *Tepidiphilus succinatimandens* comb. nov., emended description of the genus *Tepidiphilus* and description of *Tepidiphilus thermophilus* sp. nov., isolated from a terrestrial hot spring, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 64, (2014), DOI: 10.1099/ijms.0.056424-0
- RAINEY, F. A., DONNISON, A. M., JANSSEN, P. H., SAUL, D., RODRIGO, A., BERGQUIST, P. L., DANIEL, R. M., STACKEBRANDT, E., MORGAN, H.W.: Description of *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* gen. nov., sp. nov.: An obligately anaerobic, extremely thermophilic, cellulolytic bacterium, *FEMS Microbiology Letters*, 120, (1994), DOI: 10.1111/j.1574-6968.1994.tb07043.x
- RAMPELOTTO, P. H.: Resistance of microorganisms to extreme environmental conditions and its contribution to astrobiology, *Sustainability*, 2, (2010), DOI: 10.3390/su2061602
- ROTHSCHILD, L. und MANCINELLI, R.: Life in extreme environments, *Nature*, 409, (2001), DOI: 10.1038/35059215
- RYAN, R. P., MONCHY, S., CARDINALE, M., TAGHAVI, S., CROSSMAN, L., AVISON, M. B., BERG, G., VON DER LELIE, D., DOW, J. M.: The versatility and adaptation of bacteria from the genus *Stenotrophomonas*, *Nature Reviews Microbiology*, 7, (2009), DOI: 10.1038/nrmicro2163
- SALINAS, M. B., FARDEAU, M.-L., CAYOL, J.-L., CASALOT, L., PATEL, B. K. C., THOMAS, P., GARCIA, J.-L., OLLIVIER, B.: *Petrobacter succinatimandens* gen. nov., sp. nov., a moderately thermophilic, nitrate-reducing bacterium isolated from an Australian oil well, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, (2004), DOI: 10.1099/ijms.0.02732-0
- SALTER, S. J., COX, M. J., TUREK, E. M., CALUS, S. T., COOKSON, W. O., MOFFATT, M. F., TURNER, P., PARKHILL, J., LOMAN, N. J., WALKER, A. W.: Reagent and laboratory contamination can critically impact sequence-based microbiome analyses, *BMC Biology*, 12, (2014), DOI: 10.1186/s12915-014-0087-z
- SEKIGUCHI, Y., MURAMATSU, M., IMACHI, H., NARIHIRO, T., OHASHI, A., HARADA, H., HANADA, S., KAMAGATA, Y.: *Thermodesulfobrio aggregans* sp. nov. and *Thermodesulfobrio thiophilus* sp. nov., anaerobic, thermophilic, sulfate-reducing bacteria isolated from thermophilic methanogenic sludge, and

emended description of the genus *Thermodesulfovibrio*, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58, (2008), DOI: 10.1099/ijs.0.2008/000893-0

TRUMPP, M.: Thermische Abbaubarkeit des Kalkinhibitors NC47.1B und Evaluierung von potenziellen neuen Kalkinhibitoren für den Einsatz in der Tiefengeothermie im bayerischen Molassebecken, Masterarbeit Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie KIT (2022)

VISHNIVETSKAYA, T., A., HAMILTON-BREHM, S. D., PODAR, M., MOSHER, J. J., PALUMBO, A. V., PHELBS, T. J., KELLER, M., ELKINS, J. G.: Community analysis of plant biomass-degrading microorganisms from Obsidian Pool, Yellowstone National Park, *Microbial Ecology*, 69, (2015), DOI: 10.1007/s00248-014-0500-8

WANNER, C., EICHINGER, F., JAHRFELD, T., DIAMOND, L. W.: Causes of abundant calcite scaling in geothermal wells in the Bavarian Molasse Basin, Southern Germany, *Geothermics*, 70, (2017), DOI: 10.1016/j.geothermics.2017.05.001

WATANABE, M., KOJIMA, H., FUKUI, M.: Review of *Desulfotomaculum* species and proposal of the genera *Desulfallas* gen. nov., *Desulfofundulus* gen. nov., *Desulfofarcimen* gen. nov. and *Desulfohalotomaculum* gen. nov., *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 68, (2018), DOI: 10.1099/ijssem.0.002915

WHITMAN, W. B., RAINEY, F., KÄMPFER, P., TRUJILLO, M., CHUN, J., DE VOS, P., HEDLUND, B., DEDYSH, S.: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, *Tepidiphilus*, (2015), DOI: 10.1002/9781118960608.gbm01831

WHITMAN, W. B., RAINEY, F., KÄMPFER, P., TRUJILLO, M., CHUN, J., DE VOS, P., HEDLUND, B., DEDYSH, S.: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, *Thermoanaerobacteraceae* fam. nov, (2015), DOI:10.1002/9781118960608.fbm00149

WÜRDEMANN, H., WESTPHAL, A., KLEYBÖCKER, A., MIETHLING-GRAFF, R., TEITZ, S., KASINA, M., SEIBT, A., WOLFGRAMM, M., EICHINGER, F., LERM, S.: Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen, *Grundwasser*, 21, (2016), DOI: 10.1007/s00767-016-0324-1.