

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/10/2016

Projekttitlel:

NoScale

Charakterisierung von thermalen Tiefengrundwässern zur Verhinderung von Ausfällungen
und Korrosionen bei Geothermieanlagen

Projektnummer:

843827

e!Mission.at - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01.02.2014
Projektende	31.07.2016
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	30 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Dr. Edith Haslinger
Postadresse	Konrad-Lorenz-Str. 24, 3430 Tulln
Telefon	050550 – 3608
Fax	050550 – 3452
E-mail	edith.haslinger@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at

NoScale

Charakterisierung von thermalen Tiefengrundwässern zur Verhinderung von Ausfällungen
und Korrosionen bei Geothermieranlagen

AutorInnen:

DI Dr. Edith Haslinger, AIT
Univ.Prof. Dr. Johann Goldbrunner, Geoteam
Univ.Prof. Dr. Martin Dietzel, TU Graz
Dipl.Chem. Dr. Albrecht Leis, Joanneum Research

Dr. Ronny Boch, TU Graz
Daniel Elster MMSc., AIT
Dr. Heinz Fröschl, Seibersdorf Labor GmbH
Mag. Marlies Gold, Geoteam
Dr. Dorothee Hippler, TU Graz
DI Dr. Ralf Knauss, Joanneum Research
DI Otmar Plank, AIT
Mag. Andrea Shirbaz, Geoteam
Dr. Stefan Wyhlidal, AIT

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Ausgangslage	6
3	Inhaltliche Darstellung.....	13
3.1	Erhebung der geologischen, hydrochemischen und isotopenchemischen Daten der untersuchten Hydrogeothermialanlagen inklusive der Beprobung von angetroffenen Ausfällungen	13
3.1.1	Beprobung von Hydrogeothermialanlagen	13
3.1.2	Chemisch-mineralogische Untersuchung der Wasser- und Gesteinsproben und der Ausfällungen	17
3.1.3	(Hydro-)Geologische-hydrochemische Datenbank	20
3.2	Experimente zu Auswirkungen des Thermalwassers auf Komponenten von Geothermieanlagen und Analyse von Ausfällungen an Komponenten	22
3.2.1	Autoklavenversuche bei atmosphärischem Druck	22
3.2.2	Untersuchungen zu Wasser-Gesteins-Interaktionen.....	28
3.2.3	Fallstudie Versinterung in Rohren und auf Wärmetauschern.....	32
3.3	Modellrechnungen und Simulationen der Auswirkungen der Nutzung von Thermalwasser in Geothermieanlagen.....	37
3.3.1	Modellierungen des Lösungsverhaltens der Wässer in unterschiedlichen Thermalanlagen	37
3.3.2	Simulation von Wasser-Gesteins-Interaktionen	38
3.3.3	Prozesssimulation Frutura.....	40
3.3.4	Strömungssimulation Plattenwärmetauscher	41
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	48
5	Ausblick und Empfehlungen.....	49
6	Literaturverzeichnis.....	52
7	Kontaktdaten.....	53

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes NoScale war die Beurteilung des Risikos von Ausfällungen (Scaling) und Korrosionen bei der Nutzung von thermalen Tiefengrundwässern in Geothermieanlagen und Thermalbädern.

Aus geologischer Sicht wird Österreich in zahlreiche Einheiten gegliedert, deren hydrogeologische Eigenschaften und geothermale Bedingungen signifikant variieren. Thermalwassererschließungen und –nutzungen konzentrieren sich hier im Wesentlichen auf die großen Sedimentbecken (gelb in Abbildung 1). Das sind die Molassezone Oberösterreichs (bei diesem Projekt inklusive dem Süddeutschen Molassebecken) im Norden und im kleineren Rahmen das Steirische Becken, das Wiener Becken mit Niederösterreichischer Molassezone sowie das Pannonische Becken im Süden bzw. Osten.

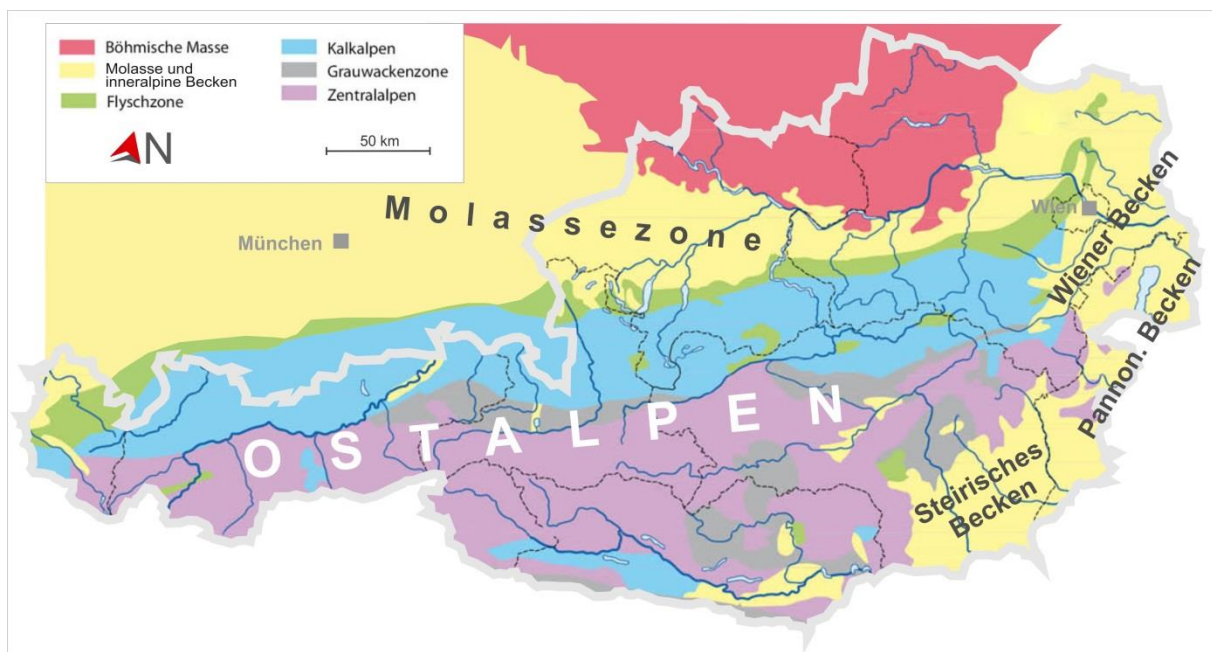


Abbildung 1: Geologische Einheiten in Österreich (Kartengrundlage Ed. Hölzl, 2016).

Aufgrund der komplexen Geologie Österreichs haben die einzelnen thermalen Tiefengrundwasserkörper, die zur Förderung von Thermalwässern genutzt werden, eine stark unterschiedliche hydrochemische Fazies. Aber auch in Aquiferen mit ähnlichen hydrochemischen Bedingungen, wie z.B. im Malmaquifer des Süddeutschen und Oberösterreichischen Molassebeckens, weisen die Wässer der in Nutzung befindlichen Anlagen charakteristische Unterschiede mit individuellen Problemstellungen auf. Während der Förderung des Thermalwassers kann es durch Druck- und Temperaturänderungen und Entgasungsprozesse zu einer Reihe hydrochemischer Folgereaktionen wie Lösungs- und

Fällungsprozessen (Scaling) oder auch Korrosionsvorgängen kommen. Geothermale Fluide können deshalb in der Thermalbohrung selbst sowie in den angebotenen oberirdischen technischen Anlagen äußerst problematisch sein. Beispielsweise erfolgt bei Sauerstoffzutritt die Oxidation von gelöstem Eisen und Mangan, wodurch sich Verockerungsbeläge in sämtlichen wasserleitenden Komponenten der Geothermieanlage (Bohrloch-Verrohrung, Leitungen, Wärmetauscher, Pumpen etc.) bilden. Alle beschriebenen Prozesse können zu erheblichen technischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten bis hin zur Aufgabe der Anlage führen.

Im Projekt NoScale wurden im Rahmen von parallel durchgeführten umfassenden chemischen und mineralogischen Experimenten einerseits Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Thermalwasser auf unterschiedliche technische Komponenten von Geothermieanlagen gewonnen und andererseits eine Datengrundlage für die modellhafte Simulation der maßgeblichen hydrochemischen Prozesse erarbeitet. Auf Basis der Ergebnisse detaillierter hydrochemischer Modellrechnungen wurden in weiterer Folge mögliche Auswirkungen der Nutzung der Thermalwässer auf die technischen Komponenten der Geothermieanlagen aufgezeigt.

Dieser Ansatz einer Kombination aus komplexen Modellrechnungen, detaillierten Laboruntersuchungen und experimentellen Ansätzen wurde bis dato in Österreich noch nicht verfolgt. Die Forschungsergebnisse tragen wesentlich zur Bewusstseinsbildung gegenüber potenziellen Risiken bei der Förderung von Thermalwasser bei. Dadurch soll das Projekt NoScale Betreiber von Geothermieanlagen unterstützen, schon im Vorfeld einer geplanten Bohrung, mögliche Risiken von Ausfällungen und Korrosionen abschätzen zu können, welches zu einem wesentlich energie- und kosteneffizienterem Betrieb führt.

Im Laufe des Projekts konnten die bisherigen Erkenntnisse über die relevanten Wasser-Gesteins-Interaktionen im Bereich von Thermalbohrungen erweitert und vertieft sowie Einblicke über kritische hydrochemische Prozesse in den wasserführenden Teilen geothermischer Anlagen (Pumpen, Leitungen, Wärmetauscher) gewonnen werden.

2.2 Ausgangslage

Aufgrund der hohen Leistungsanforderungen bei der Nutzung von hydrothermalen Geothermie für die Fernwärmeversorgung und die Stromerzeugung kommen nur Aquifere mit hohen Transmissivitäten für eine Erschließung in Frage. Die Grenze der Wirtschaftlichkeit liegt ungefähr bei einer Transmissivität von $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Dieses Kriterium erfüllen im Allgemeinen nur Aquifere in Kalken und Dolomiten, welche sekundär durch tektonische Beanspruchung und Verkarstung unter Süßwassereinfluss vor der Tiefenversenkung entsprechende Durchlässigkeiten aufgebaut haben. Derartige Aquifere unterliegen auch keiner Reduktion des Porenraumes in thermisch interessanten Tiefen, wie dies bei reinen Porenaquiferen der Fall ist. Aufgrund der vorherrschenden thermischen

Bedingungen – die höchsten Gradienten liegen bei 5 K/100 m, im Durchschnitt jedoch bei 3 K/100 m – ist es erforderlich, gut durchlässige Aquifere in Tiefen von über 2.000 m zu erschließen, um Temperaturen um 100 °C zu erzielen.

Die Erschließung von hydrogeothermalen Ressourcen stellt thermodynamisch gesehen eine Störung des Gleichgewichts zwischen Thermalwasser und umgebender Gesteinsmatrix des Aquifers dar, da die ursprünglich vorherrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse eine mehr oder weniger starke Veränderung erfahren. Während der Förderung des Thermalwassers verändern sich Druck und Temperatur, wobei es gleichzeitig zu einem mehr oder weniger starken Entgasungsprozess kommt. Allein durch diese Veränderungen, kann es zu einer Reihe hydrochemischer Folgereaktionen wie Lösungs- und Fällungsprozessen oder auch Korrosionsvorgängen kommen (Stober & Bucher, 2012). Geothermale Fluide können deshalb in technischen Anlagen äußerst problematisch sein. Insbesondere die Entgasung von CO₂ kann zu erheblichen Nutzungseinschränkungen von Geothermieanlagen führen. Ein weiteres Problem stellt unter Umständen die Mischung von Wässern unterschiedlicher hydrochemischer Zusammensetzung dar. So kann es beispielsweise bei der Zumischung karbonatreicher Wässer, wie sie in Österreich stark verbreitet sind, in kurzer Zeit zu umfangreichen Sinterbildungen (allmähliche Ablagerungen) in Rohrleitungen von z.B. Ableitungssystemen kommen (Rinder et al., 2013). Auch die, durch die thermische Nutzung des Thermalwassers bewirkte Abkühlung, sowie ein möglicher Sauerstoffzutritt bei dem Kontakt der Wässer mit der Atmosphäre kann zu signifikanten Verschiebungen von chemischen Gleichgewichten in der Lösung führen und dadurch beispielsweise Ausfällungsprozesse von schwerlöslichen oder redoxsensitiven Mineralphasen bewirken. Diese vielfältigen und nur schwer vorhersagbaren Reaktionen können einerseits zu massiven Problemen an den technischen Anlagen führen und andererseits kann es im Umgebungsbereich der Bohrung zu Änderungen der Porosität und Permeabilität des Aquifers kommen, was den Volumenstrom und damit die Anlageneffizienz bzw. Nutzbarkeit des Aquifers stark beeinträchtigen kann (Fritz et al., 2010). So ist z.B. die Zementation des Porenraums durch Karbonatminerale (Yoo et al., 2013) oder Anhydrit (Pape et al., 2005) ein bekanntes Problem. Bei Sauerstoffzutritt erfolgt die Oxidation von gelöstem Eisen und Mangan, wodurch sich Verockerungsbeläge (im Wesentlichen Fe- und Mn-O-OH Verbindungen) in sämtlichen wasserleitenden Komponenten der Geothermieanlage (Leitungen, Wärmetauscher, Pumpen etc.) bilden können. Die zeitliche Dynamik dieser Reaktionen ist sehr unterschiedlich und reicht von spontanen Fällungsprozessen bis zu schleichenden Korrosionserscheinungen, sodass Probleme an z.B. Pumpen oder Wärmetauschern erst nach einigen Jahren des Betriebs der Anlage auftreten können. Dies kann zu erheblichen Sanierungskosten, zum Stopp von Geothermieprojekten (z.B. GeneSys-Projekt der BGR Deutschland auf Grund von unerwarteten Salzausfällungen, die den

Wasserdurchsatz erheblich verminderten¹⁾ und im Worst Case zur Einstellung des Betriebes führen²⁾.

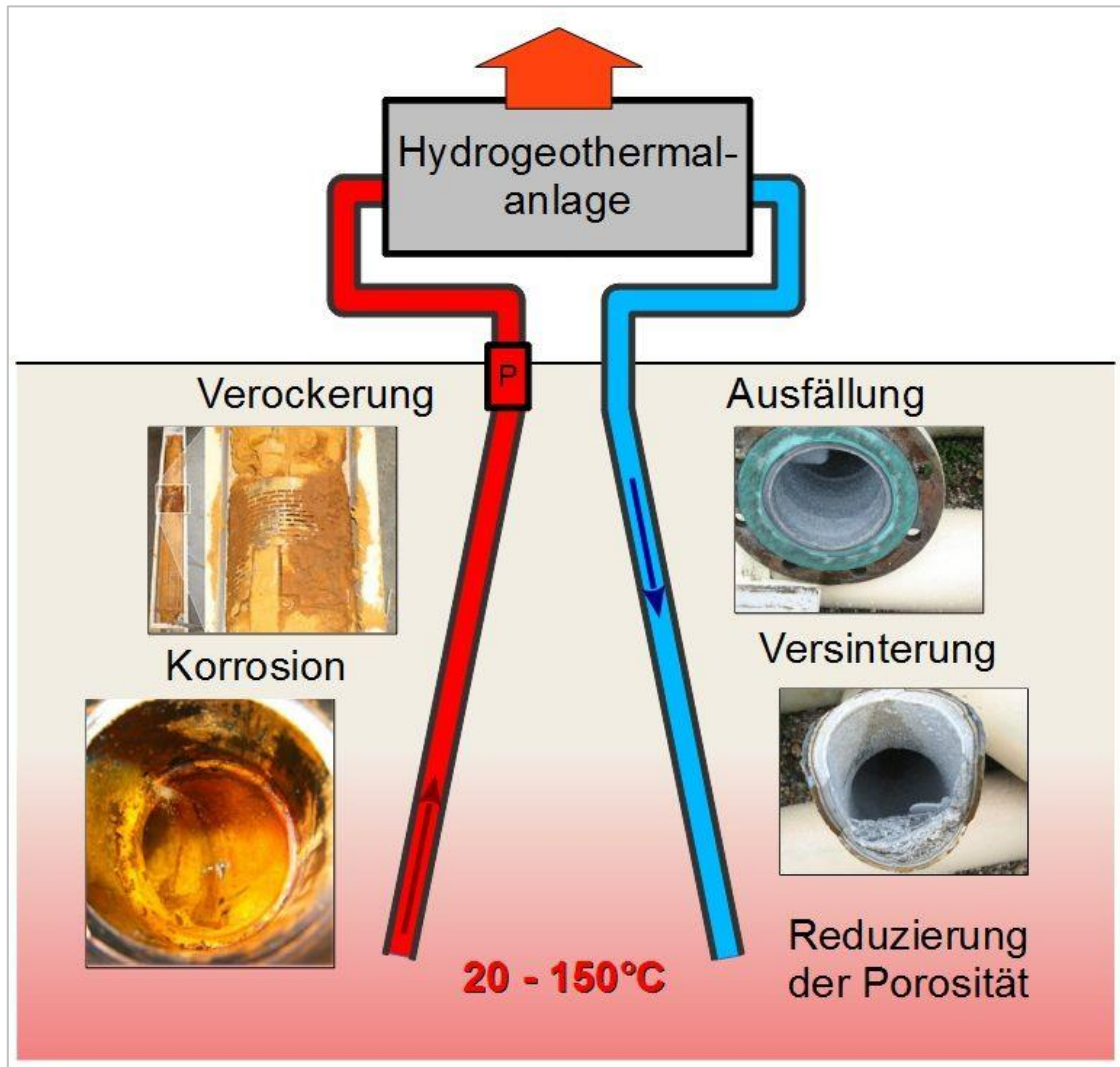


Abbildung 2: Übersicht über mögliche Auswirkungen von Ausfällungen und Korrosionen bei den wasserführenden Teilen einer Geothermianlage.

Die wichtigsten **korrosiven Inhaltsstoffe** sind u.a. Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Chlorid, Hydrogensulfid, Kohlendioxid und Sulfate. **Ausfällungen (Scales)** sind vor allem durch hohe Erdalkali- (Kalzium, Magnesium, in Einzelfällen auch Barium und Strontium) und Hydrogenkarbonatgehalte bedingt. Die Ausfällungen können auch z.T. toxische und kanzerogene Elemente (z.B. Arsen, Cadmium, Blei, Quecksilber) aber auch Radionuklide (z.B. Pb-210, Ra-224) beinhalten.

¹<http://www.genesys-hannover.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/GeneSys/bgr-111212.html?nn=1554506> (letzter Zugriff: 02.09.13)

²Personenkreis Geothermie der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Geologie (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern, Wiesbaden. (Online verfügbar unter: http://www.inforgeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf; zuletzt abgerufen am: 22.08.13)

Aufgrund der unterschiedlichen geologischen und hydraulischen Randbedingungen in den einzelnen geothermischen Aufschließungsgebieten muss auf die individuelle Problematik jeder Anlage, die sich aufgrund der örtlichen geochemischen Bedingungen und der bei der Förderung vorherrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse ergeben, gesondert eingegangen werden. Betreiber sind am energie- und kosteneffizienten Betrieb ihrer Anlagen interessiert, widmen aber den (hydro)geologischen und hydrogeochemischen Gegebenheiten am Standort zumeist zu wenig Aufmerksamkeit.

Spezielle Untersuchungen, welche die chemisch-mineralogischen Reaktionen, die bei der Förderung und Nutzung des Thermalwassers auftreten können, werden im Normalbetrieb einer Anlage nicht durchgeführt; sie sind in der Regel auch nicht behördlich vorgeschrieben. Bergrechtliche Bewilligungen sehen zumeist den Einsatz von Korrosions-Coupons vor.

In Publikationen und Leitfäden für Thermalwassernutzung wird zwar betont, dass die hydrochemischen Verhältnisse beim Betrieb von geothermischen Anlagen zu überprüfen sind. Allerdings fehlen bis dato genaue Untersuchungen zu den Auswirkungen der Förderung und Nutzung unterschiedlicher Wassertypen für die Verwendung in Geothermieanlagen. Speziell in Bezug auf die Mischung von Wässern unterschiedlicher hydrochemischer Zusammensetzung und unterschiedlicher CO₂-Partialdrücke fehlen detaillierte Untersuchungen und Modellierungen der resultierenden chemischen Reaktionen, insbesondere der Langzeitauswirkungen auf technische Anlagen. Genaue Richtlinien und damit Orientierungshilfen für Betreiber fehlen nahezu vollständig.

Aufgrund der komplexen Geologie Österreichs liegen in den einzelnen Aquifern Grundwässer mit sehr unterschiedlicher hydrochemischer Zusammensetzung vor. Die chemische Zusammensetzung der Fluide variiert daher stark von Standort zu Standort bzw. teilweise sogar innerhalb eines individuellen Standorts (z.B. bei Förderstrecken in Aquifern großer Mächtigkeit) und hängt vorrangig von der Lithologie des Aquifers ab. Auch die Druck- und Temperaturverhältnisse und die geochemischen Eigenschaften des Aquifers haben einen maßgeblichen Einfluss auf die hydrochemischen Eigenschaften geothermaler Fluide. Im Vorfeld einer geothermischen Nutzung dieser Aquifere sind in der Regel die Auswirkungen der Fluide auf die technischen Anlagen nur schwer prognostizierbar. Dies betrifft besonders die Langzeitauswirkungen bei der Förderung und Nutzung sowie den Aspekt der Reinjektion der Fluide. Umfangreicher Forschungsbedarf besteht insbesondere in Hinblick auf die Auswirkungen der Mischung von Wässern, die verschiedenen Aquifern entstammen, in Bezug auf mögliche Sekundärreaktionen, wie die Abscheidung von Festphasen.

Zusammenfassend können **folgende negativen Auswirkungen von Ausfällungs- und Korrosionsprozessen im Betrieb einer Hydrogeothermalanlage** festgehalten werden:

- Mögliche erhebliche **Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit** der eingesetzten technischen Komponenten (z.B. Wärmetauscher)
- **Reduktion der Ergiebigkeit** der Förderbohrung, Verschlechterung der Reinjektivität,
- dadurch **steigende Kosten** für Betrieb (höherer Energieeinsatz), Austausch oder Sanierung

Schwerpunkte des Projektes

Abgeleitet von der obigen Aufgabenstellung können folgende Aspekte als Schwerpunkte des Projekts formuliert werden:

- **Beurteilung des Risikos von Ausfällungen** (Scaling) und Korrosionen bei der Nutzung von thermalen Tiefengrundwässern.
- Schaffung der **Grundlagen für das Verständnis von thermodynamisch-kinetischen Prozessen** (wie Ausfällungen und Korrosionen) wie sie bei der Förderung und Nutzung von thermalen Tiefengrundwässern entstehen.
- **Offenlegung von Wasser-Gesteins-Interaktionen** und damit verbundene hydrochemische Prozesse bei Förderung des Wassers **durch Analysen, Experimente und Modellrechnungen.**
- Rückschlüsse über die **Auswirkungen von Thermalwasser** auf unterschiedliche **technische Komponenten von Geothermieanlagen** als Ergebnis chemischer und mineralogischer Laboruntersuchungen.

Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelte prioritär:

Schwerpunkt TF 3/3.4 Tiefe Geothermie

Subschwerpunkt: (Weiter-)Entwicklung von Systemkomponenten und Explorationstechnologien [...] unter Berücksichtigung von bei der geothermalen Nutzung typisch hohen Temperaturen, Drücken und korrosiven Rahmenbedingungen [...].

Begründung: Das Forschungsprojekt NoScale beschäftigt sich mit der Untersuchung der Beeinträchtigung von technischen Komponenten von Geothermieanlagen durch Inhaltsstoffe von thermalen Tiefengrundwässern infolge anlagenkritischer hydrochemischer Prozesse wie z.B. Ausfällung und Korrosion. Im gegenständlichen Projekt wird das Ausfällungs- und Korrosionspotenzial von realen Thermalwässern auf der Grundlage der Analyse von Materialproben aus existierenden Anlagen und experimentellen Ansätzen sowie umfangreiche hydrochemischen Simulationsrechnungen untersucht.

Das Projekt liefert weiters Beiträge zu

Schwerpunkt TF 2/2.1 Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe

Subschwerpunkt: Optimierung bestehender und Entwicklung neuer energieeffizienter Produktionsprozesse in Simulation und Experiment

Subschwerpunkt: Reduktion des Energieeinsatzes im Prozess

Begründung: Die Kombination von Simulation und Experiment – wie in NoScale vorgesehen - erlaubt es, thermale Wässer unterschiedlicher Zusammensetzung hinsichtlich ihres Ausfällungs- und Korrosionspotenzials zu charakterisieren und problematische prozesstechnische Bedingungen bereits im Vorfeld zu identifizieren. Die vorausschauende Kenntnis möglicher hydrochemischer Reaktionen gestattet es dem Betreiber, mögliche kritische Prozesse in einzelnen Anlagenteilen zu erkennen und durch im Vorfeld gesetzte Gegenmaßnahmen, wie z.B. Anpassung der Förderraten, Temperaturgradienten und Materialeigenschaften der geothermischen Anlagen, zu vermeiden. Dadurch ist es für den Betreiber einer geothermischen Anlage möglich, die Investitions- und insbesondere die Betriebskosten und das Ausfallrisiko deutlich zu senken. Scaling- und Korrosionsprozesse können die Funktionsfähigkeit der eingesetzten Komponenten – z.B. Pumpen und Wärmetauscher – so wie die Ergiebigkeit der Förderbohrung erheblich beeinträchtigen. Dadurch steigen nicht nur die Kosten für den Austausch oder die Sanierung der mit dem Thermalwasser in Berührung kommenden Komponenten, sondern auch der Energieeinsatz für die Förderung des thermalen Tiefengrundwassers.

Ausschreibungsziele:

Das hier vorgeschlagene interdisziplinäre Forschungsprojekt NoScale orientiert sich sowohl an der Programmstrategie und den Programmzielen, die im Ausschreibungsleitfaden definiert sind, als auch an den energiepolitischen Zielen der österreichischen Bundesregierung, wie sie in der Energieforschungsstrategie für Österreich und der EnergieStrategie Österreich formuliert sind.

Österreich hat sich den 20-20-20-Zielen der Europäischen Union verpflichtet und daher Strategien¹, 2 und Forschungsprogramme – wie die vorliegende e!Mission.at-Ausschreibung - ins Leben gerufen, um diese Ziele auf österreichischer Ebene u.a. durch verstärkte Forschung auf diesem Gebiet zu erfüllen. Die Tiefe Geothermie erschließt bei korrekter Planung und Anwendung eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle – die im Erdinneren gespeicherte Wärme - und gilt als grundlastfähige erneuerbare Energiequelle, welche wesentlich zu einer langfristigen Energieversorgung durch erneuerbare Energien (Ziel 1: Beitrag zur Erfüllung der energie- klima- und technologiepolitischen Vorgaben der österreichischen Vorgaben) beitragen kann. Die Tiefe Geothermie besitzt zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch entscheidende Ausbaupotenziale unter Berücksichtigung der bislang erprobten Anwendungsmethoden (vorrangig Hydrogeothermie, d.h. die Nutzung natürlicher Thermalwässer). Im Jahr 2009 wurde in Österreich eine Gesamtkapazität von Anwendungen der Tiefen Geothermie in der Höhe von ca. 80 MW thermisch (MW_{th}) erhoben. Es ist aber davon auszugehen, dass alleine in den geothermisch noch nicht genutzten

Gebieten mit Thermalwasservorkommen (z.B. Wiener Becken) Ressourcen in der Größenordnung von mindestens 500 MW_{th} zu erwarten sind. Eine aktuelle Abschätzung der hydrogeothermischen Anwendungspotenziale (Nutzung natürlicher Thermalwässer) ist zwar noch nicht exakt hochgerechnet worden, es kann aber von einem Wärmegewinnungspotenzial von 800 bis 1,000 MW_{th} ausgegangen werden.

Da die Hydrogeothermie gerade in Österreich ein derartiges Ausbaupotenzial birgt, ist die Kenntnis der wesentlichsten Grundlagen auf diesem Gebiet, die zur Sicherheit und Effizienz von Geothermieranlagen beitragen, von größter Wichtigkeit. Mit den im Projekt NoScale vorgesehenen Untersuchungen und Schwerpunkten möchte das Konsortium zum Wissen um die Auswirkungen der Förderung und Nutzung von thermalen Tiefengrundwässern und damit zur Steigerung der Sicherheit und der Kosten- und Energieeffizienz von Geothermieranlagen (Ziel 2: Erhöhung der Leistbarkeit von nachhaltiger Energie und innovativen Energietechnologien) beitragen und damit zur gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit von österreichischen Unternehmen, da diese durch die Erkenntnisse von NoScale, eine bessere Vorhersagbarkeit, Planbarkeit und Anpassungsmöglichkeit bezüglich der Auswirkungen des Tiefengrundwassers auf ihre Anlagen haben, was wiederum eine Senkung der Betriebskosten und eine Verringerung des Ausfallrisikos der Anlagen mit sich führt. Des Weiteren profitieren auch die beteiligten Forschungsinstitute und der Unternehmenspartner durch einen deutlichen Wissens- und Kompetenzzuwachs, der infolge der geplanten Untersuchungen im Forschungsprojekt NoScale zu erwarten ist. In der Energieforschungsstrategie Österreich formuliert die österreichische Bundesregierung weiters die Notwendigkeit einer verstärkten energierelevanten Grundlagenforschung mit Fokus auf chemischen, physikalischen und mathematischen Grundlagen. Das Projekt NoScale möchte mit thermodynamisch basierten hydrochemischen Simulationsrechnungen – begleitend zu Laborexperimenten unter realen Bedingungen – die Grundlagen für das Verständnis von thermodynamisch-kinetischen Prozessen wie Ausfällungen und Korrosionen, wie sie bei der Förderung und Nutzung von thermalen Tiefengrundwässern entstehen, schaffen. Dadurch wird auch die österreichische Forschungslandschaft und die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie wesentlich gestärkt (Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet innovativer Energietechnologien).

3 Inhaltliche Darstellung

Die Arbeiten im Projekt NoScale wurden in folgende Arbeitsschritte geteilt:

- I. Datenerhebung, Beprobung und Charakterisierung der Thermalwasserreservoirs (3.1)
- II. Experimente zu Auswirkungen des Thermalwassers auf Komponenten von Geothermieranlagen und Analyse von Ausfällungen an Komponenten (3.2)
- III. Hydrochemische Modellierung und Prozessmodellierung (3.3)

3.1 Erhebung der geologischen, hydrochemischen und isotopenchemischen Daten der untersuchten Hydrogeothermieranlagen inklusive der Beprobung von angetroffenen Ausfällungen

3.1.1 Beprobung von Hydrogeothermieranlagen

Von den 15 beprobten Hydrogeothermieranlagen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4) wurden Proben der Thermalwässer entnommen sowie je nach Verfügbarkeit Ausfällungen und/oder Komponenten der wasserführenden Elemente der Geothermieranlage, die bereits Ausfällungen aufweisen, mitgenommen, um sie chemisch-mineralogisch zu untersuchen.

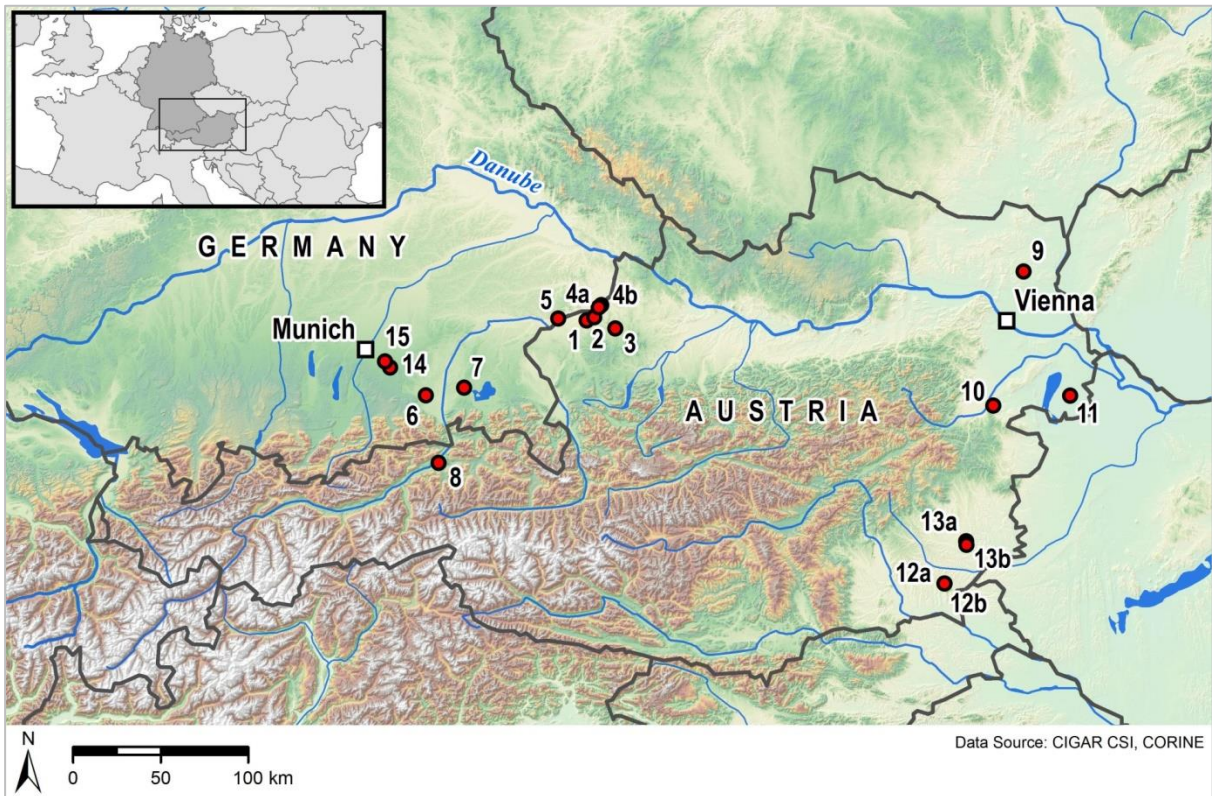


Abbildung 3: Übersicht über die beprobten Hydrogeothermalkanlagen in Österreich und Bayern.

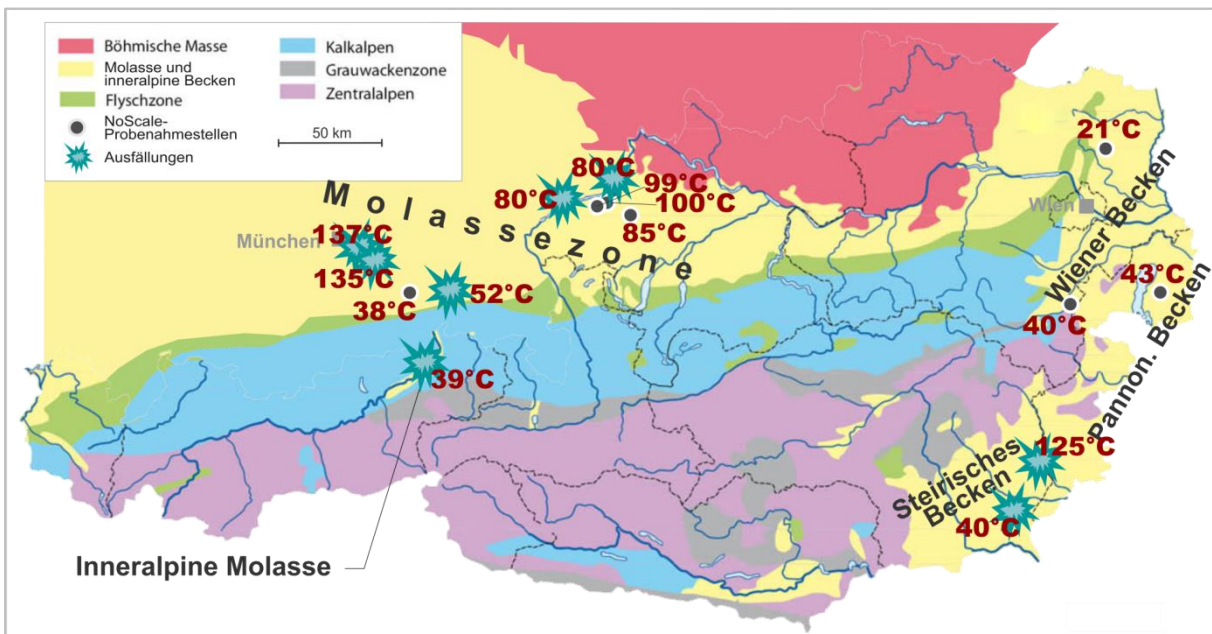


Abbildung 4: Geologische Verortung der beprobten Hydrogeothermalkanlagen sowie die Wassertemperaturen am Sondenkopf. Anlagen, bei denen Ausfällungen angetroffen und beprobt wurden, sind mit einem türkisen Zeichen markiert.

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die angetroffenen Ausfällungen kategorisiert, die grafische Darstellung erfolgt in Abbildung 5.

Tabelle 1: Übersicht über die Arten und Orte der angetroffenen Ausfällungen!

→ Material	→ Ort der Ausfällung
→ Karbonate	→ Rohre, Wärmetauscher
→ Fe-Oxide/-Hydroxide	→ Sondenkopf
→ Fe-Sulfide	→ Wärmetauscher, Rohre, Absperrklappen
→ Schwefel, Sulfat	→ Wärmetauscher

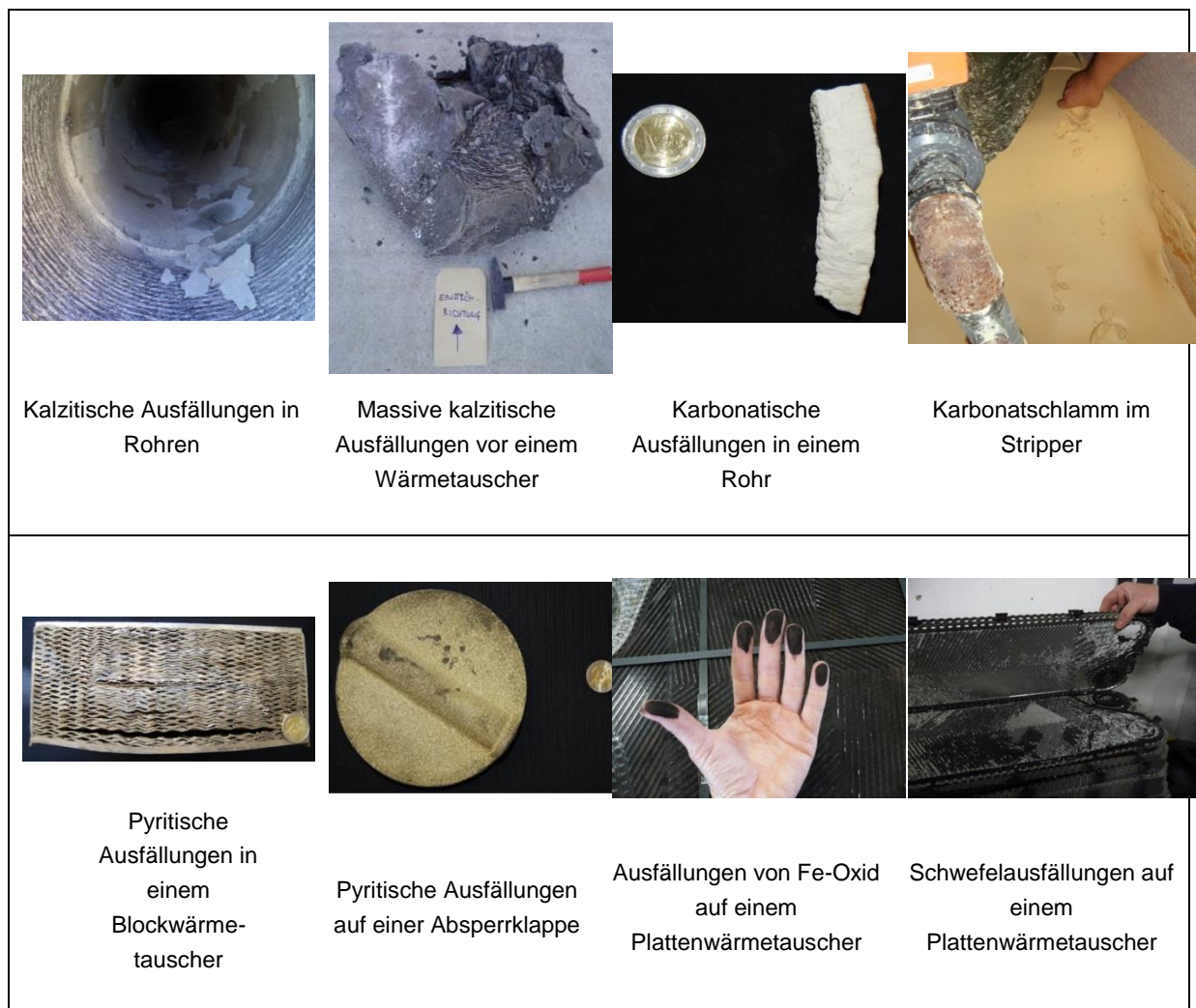


Abbildung 5: Einige Beispiele für die bei den Probenahmen angetroffenen Ausfällungsprobleme.

Bezüglich der Ausfällungen stachen zwei geografisch benachbarte sowie baugleiche Anlagen besonders heraus. Bei diesen beiden Anlagen bildeten sich innerhalb von 14 – 17 Tagen an den Wärmetauschern derart massive Ausfällungen, sodass diese beiden Anlagen aufgrund der Ausfällungen schon nach einem Jahr Probebetrieb stillgelegt werden mussten (siehe Abbildung 5, rechts oben und Abbildung 6). Zum Zeitpunkt der Probenahme war noch völlig unklar, was zu diesen massiven Ausfällungen geführt hat. Dies wurde in den Arbeitspaketen 3 und 4 untersucht (siehe dort) und es konnte ein Erklärungsansatz gefunden werden.



Abbildung 6: Massive Ausfällungen vor dem Wärmetauscher bei einer Anlage

3.1.2 Chemisch-mineralogische Untersuchung der Wasser- und Gesteinsproben und der Ausfällungen

Die Thermalwässer der 15 beprobten Hydrogeothermieranlagen sowie die Ausfällungen wurden geochemisch-hydrochemisch und mineralogisch mit routineanalytischen Methoden untersucht.

- **Hydrochemische Analysen der Thermalwässer:**
Von den Thermalwässern wurden sämtliche Haupt-, Neben- und Spurenelemente (insgesamt ca. 40 Parameter) mittels ICP-OES (optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) und ICP-MS (Massenspektrometrie), Parameter wie Abdampfrückstand, Gesamthärte, pH, elektrische Leitfähigkeit und Hydrogenkarbonat nach den entsprechenden Normen; mittels Photometrie: o-Phosphat, Ammonium, Kieselsäure, Sulfid und Nitrit, sowie die Anionen mittels Ionenchromatographie (IC) analysiert.
- **Geochemische und mineralogische Analysen der Aquifergesteine und der Versinterungen:**
Die Ausfällungen an den Geothermieranlagenkomponenten wurden mit einer Kombination von verschiedenen Methoden – Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF), Röntgendiffraktometrie (XRD), Säureaufschluss mit anschließender ICP-OES/MS Analyse, und LA-ICP-MS sowie Elektronenstrahl-Mikrosonde – geochemisch und mineralogisch analysiert.
- **Isotopenchemische Untersuchungen:**
Die isotopenchemische Zusammensetzung der Thermalwässer und der Versinterungen an den Anlagenkomponenten sowie der Begleitgase wurde mittels Massenspektrometrie untersucht.

Hydrochemische und isotopenchemische Zusammensetzung der Thermalwässer

Die hydrochemische Zusammensetzung der einzelnen Thermalwässer wurde in einem so genannten Piper Plot (Piper, 1960)³ zusammenfassend dargestellt. Das Diagramm besteht aus zwei Dreiecken, an deren Eckpunkte sich die Hauptkationen (links) und die Hauptanionen (rechts) befinden. Die jeweiligen Gehalte der Ionen werden auf den zwischen den Dreiecken befindlichen Rhombus projiziert. Dadurch können verschiedene Wassertypen unterschieden werden. Die Erstellung des Piper-Diagramms für die in NoScale beprobten Anlagen und die Einteilung der Wassertypen erfolgte mit der Software AquaChem (Schlumberger Water Services) – siehe Abbildung 7.

³ Piper, A.M. (1960): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Trans. Am. Geophys. Union 25, 914 – 928.

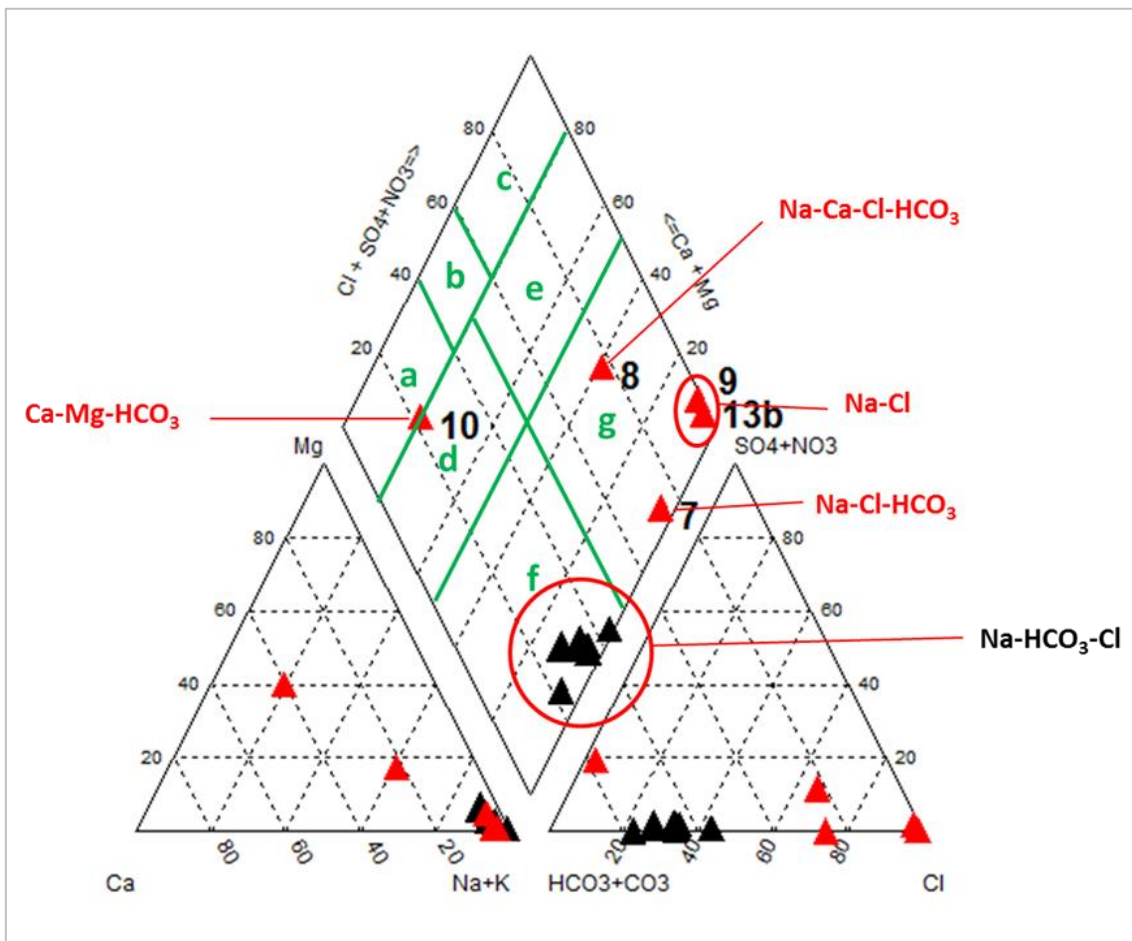


Abbildung 7: Piper-Diagramm der Thermalwässer der beprobten Anlagen und die Wassertypen nach Furtak & Langguth (1967).

- (I) Erdalkalische Wässer: a) überwiegend hydrogenkarbonatisch, b) hydrogenkarbonatisch-sulfatisch, c) überwiegend sulfatisch;
 (II) Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt: d) überwiegend hydrogenkarbonatisch, e) überwiegend sulfatisch-chloridisch;
 (III) Alkalische Wässer: f) überwiegend (hydrogen-)karbonatisch, g) überwiegend sulfatisch-chloridisch oder überwiegend chloridisch.

Das Piper-Diagramm in Abbildung 7 zeigt, dass ca. die Hälfte der Thermalwässer in die $Na-HCO_3-Cl$ -Gruppe fällt. Nach der Nomenklatur von Furtak & Langguth (1967) fallen die meisten Grundwässer der beprobten Anlagen in die Gruppe „Alkalische Wässer“ (f und g), wobei der überwiegende Teil überwiegend (hydrogen-)karbonatisch (f) und vier Anlagen überwiegend chloridisch (g) sind. Zwei der beprobten Wässer sind auch als reine $NaCl$ -Wässer anzusprechen.

Die **isotopenchemischen Analysen** der Thermalwässer ergaben, dass anhand des Deuterium-Exzesses die beprobten Wässer in drei Gruppen eingeteilt werden können (Abbildung 8):

- Gruppe 1: Wässer, deren isotopenchemische Zusammensetzung nahe oder auf der „Local (Austrian) Meteoric Water Line“ liegt.
- Gruppe 2: Wässer, deren isotopenchemische Zusammensetzung nahe oder auf der „Mediterranean Meteoric Water Line“ liegt.
- Gruppe 3: Wässer mit negativem Deuterium-Exzess.

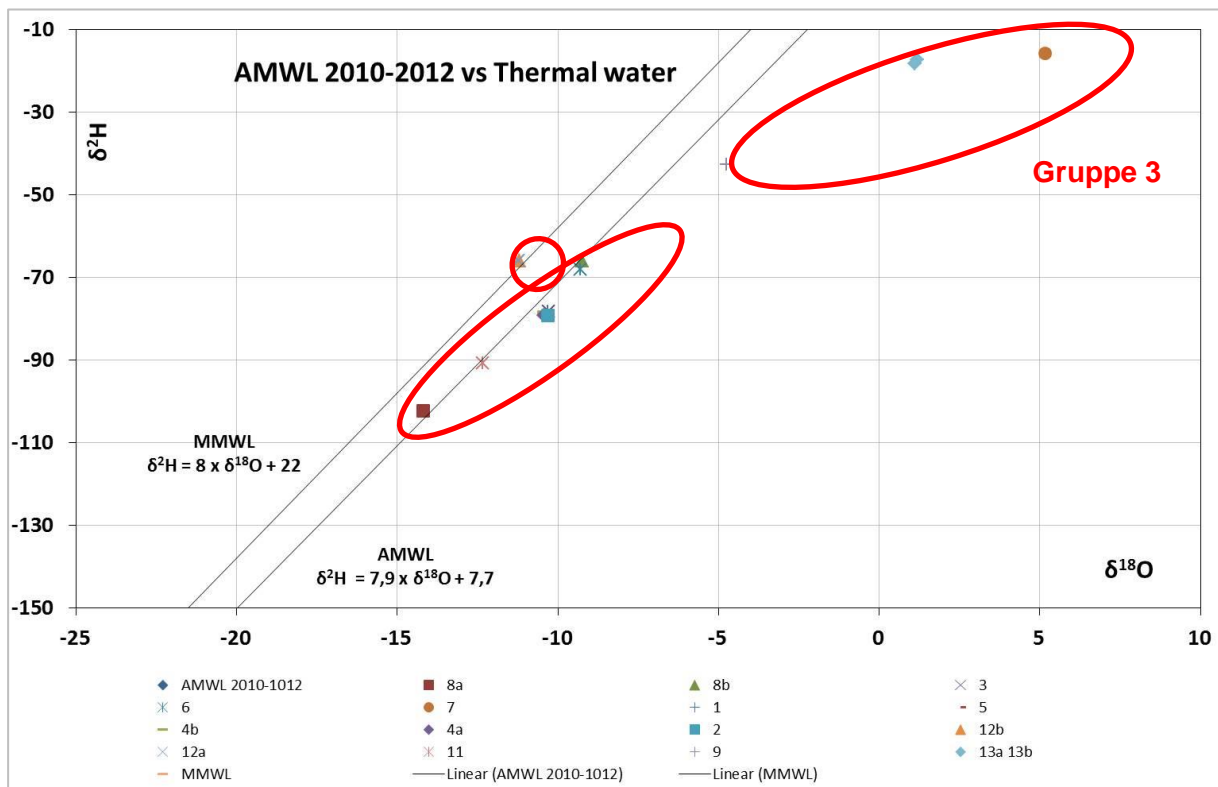


Abbildung 8: Zusammenfassende Grafik der Isotopenchemie der beprobten Thermalwässer.

Allen Wässern ist gemeinsam, dass der Tritium-Gehalt unter der Nachweisgrenze von 0,2 TU liegt, was bedeutet, dass alle Wässer eine hohe mittlere Verweilzeit haben, also nicht rezent oder mit rezenten Wässern gemischt sind.

Bei der Entscheidungsfindung, welche Ausfällungen und Inkrustationen für eine etwaige Analytik in Frage kommen, wurden die Betreiber der Geothermieranlagen mit einbezogen, um bereits im Vorfeld Informationen hinsichtlich der Betriebsweise der Anlage, Zeitintervall bis zur Bildung der Inkrustationen sowie etwaige Maßnahmen und Versuche zur Unterbindung dieser Ausfällungen abzuklären, um die chemisch-mineralogischen Untersuchungen am Probenmaterial möglichst effektiv zu gestalten.

3.1.3 (Hydro-)Geologische-hydrochemische Datenbank

In diesem Task wurden einerseits alle vorhandenen (hydro)geologischen, hydrochemischen und isotochenchemischen Daten der untersuchten Standorte in einer Excel-Datenbank zusammengeführt. Des Weiteren wurden von allen Anlagen einseitige Steckbriefe (siehe Abbildung 9) mit den wichtigsten Daten der einzelnen Anlagen angefertigt.

Die Datenbank umfasst folgende Parameter:

- **Bohrungsdetails:** ID, Bundesland, Gemeinde, Betreiber, Anschrift, Ansprechpartner, Website, Nutzung, Inbetriebnahme, Wassertyp; jeweils für Förder- und Reinjektionsbohrung: Objektbezeichnung, Koordinaten, Seehöhe, Bohrzeitpunkt, Endteufe, Aquifer, Förderrate, Förder-/Reinjektionstemperatur
- **Probenahme:** Datum, Probenehmer, Probennummer, Probenahmepunkt, pH, LF, Temp., O₂, Ausfällungen ja/nein
- **Analytik:** pH, LF, Hauptelemente, Spurenelemente, Seltene Erden
- **Isotopen:** ¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C von CO₂, CH₄, KW, DIC, ¹⁸O und ³⁴S von BaSO₄, ¹⁴C, (²²²Rn, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra)
- **Gaszusammensetzung:** CO₂, CH₄, KW, O₂, N₂, H₂S, CO₂ gelöst (titr.)
- **Sonstige Parameter:** Summe Ionen, Dichte, Abdampfdruckstand u.a.



Dublette Frutura		FRUT									
											
Allgemeine Daten											
Gemeinde	Fürstenfeld		STMK								
	Förderbohrung		Reinjektionsbohrung								
Name	Frutura GT2		Frutura GT1/1a (Gemeinde Speltenbach)								
Endteufe	3.188 [m] TVD		3.257 [m] TVD								
	3.300 [m] MD		3.279 [m] MD								
Aquifer	Grazer Paläozoikum – Armwiesen Formation (Devon)										
Fördertemperatur	115 [°C]	Reinjektionstemperatur	- [°C]								
Förderrate	50 [l/s]										
Nutzung	Wärme										
Inbetriebnahme	seit 2015 in der Testphase										
Datum Probenahme	27.11.2014										
Summe Ionen	68.560 [mg/l]										
pH Gelände	6,7										
LF Gelände (25 °C)	86.000 [µS/cm]										
Wassertyp	Chlorid Natrium Thermalwasser										
Ausfällungen	nein										
Hydrochemie: Physikochemische Parameter und Hauptelemente											
Proben-Nr (AIT)	pH Labor	LF Labor [µS/cm]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	HCO3 [mg/l]	SO4 [mg/l]	PO4 [mg/l]	Cl [mg/l]	NH4 [mg/l]
191.093	6,8	94.100	1.100	130,0	26.000	700,0	1.088	930,0	0,45	38.000	30,0
191.092	6,9	95.100	1.100	130,0	25.000	680,0	433	930,0	0,42	38.000	30,0
Neben- und Spurenelemente in erhöhter Konzentration											
Proben-Nr (AIT)	SiO2 [mg/l]	As [mg/l]	F [mg/l]	Fe [mg/l]	Li [mg/l]	Sr [mg/l]	S [mg/l]				
191.093	96,00	1,80	11,00	2,80	20,00	70,00	380,00				
191.092	97,00	1,60	9,20	3,10	19,00	68,00	380,00				
Isotopen											
Proben-Nr (AIT)	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	D-Exzess ‰	δ ¹³ C CO ₂ ‰	δ ¹³ C CH ₄ ‰	δ ¹³ C KW ‰	δ ¹³ C DIC ‰	¹⁴ C pMC			
191.093	1,11	-18,40	-27,28				-2,27	< 0,4			
191.092	1,19	-17,40	-26,92	-2,05	-42,75	0,00	-1,45	< 0,4			
Gaszusammensetzung											
Proben-Nr (AIT)	CO ₂ frei Vol%	CH ₄ frei Vol%	O ₂ Vol%	CO ₂ gelöst [mg/l]							
191.093	89,80	7,70	0,20	279,84							
191.092	89,60	7,80	0,30	684,64							

Abbildung 9: Beispiel für einen Steckbrief einer Hydrogeothermalanlage – Bohrung Frutura.

3.2 Experimente zu Auswirkungen des Thermalwassers auf Komponenten von Geothermieranlagen und Analyse von Ausfällungen an Komponenten

Die Untersuchungen in diesem Arbeitsschritt sollten neue Einblicke über die Auswirkungen von verschiedenen Thermal- und Modellwässern auf Komponenten von Geothermieranlagen (Pumpen, Wärmetauscher) bringen. Die Erkenntnisse aus den Experimenten waren essenziell für die Verifizierung und iterative Anpassung der Modellierung und erlaubten eine deutlich verbesserte Möglichkeit der Kalibrierung.

3.2.1 Autoklavenversuche bei atmosphärischem Druck

Die Arbeiten im Task orientierten sich an den zwei zentralen Forschungsfragen:

1. Welchen Einfluss haben ausgewählte Materialien und unterschiedliche Temperaturen auf das Fällungs- bzw. Abscheidungsverhalten von CaCO_3 ?
2. Lassen sich materialspezifische Nukleations- und Kristallwachstumseffekte beobachten?

Die Arbeiten wurden in folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

- i. Aufbau von Laborversuchen zur Simulation von Ausfällungs- und Abscheidungsprozessen aus einer wässrigen Lösung an unterschiedlichen Oberflächen unter verschiedenen Temperaturbedingungen
- ii. (Hydro-) Chemische bzw. bildgebende Analyse der Fluidzusammensetzung und der Mineralbildungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Bereiche der Ausfällung und Abscheidung (Substrat, Lösung respektive Bodensatz, Gefäßwand)

ad i.:

Für die Laborversuche wurden zuerst zwei Ausgangslösungen hergestellt: Lösung 1 enthielt die Elemente Ca, Mg, Ba, Sr, Na und Cl, Lösung 2 enthielt HCO_3 , Cl und Na, aus denen in den jeweiligen Reaktionsgefäßen durch Mischung im Verhältnis 1:1 die für Vaterit, Aragonit und Kalzit übersättigte Reaktionslösung angesetzt wurde. Anschließend wurden die ausgewählten Substrate in die Reaktionsgefäße bzw. die spezifisch temperierten Reaktionslösungen überführt. Die mit Deckeln verschlossenen Reaktionsgefäße wurden für die Dauer des Versuchs in versuchsspezifisch temperierten Klimaschränken aufbewahrt. Zur Kontrolle wurden die Versuche mit Substrat durch Blindversuche ohne Substrat ergänzt. Es wurden zwei Versuchsreihen (Abbildung 10) durchgeführt:

- Substrat- vs. Blindversuch
- Temperaturen:
 - (1) 40°C, 60°C und 80°C
 - (2) 30°C, 60°C und 90°C
- Bereiche der Ausfällung:
 - Substrat, Lösung (Filter und Bodensatz), Gefäßwand
- Versuchsdauer:
 - (1) 26.03.15 - 22.04.15 (27 Tage)
 - (2) 18.11.15 - 07.01.16 (50 Tage)

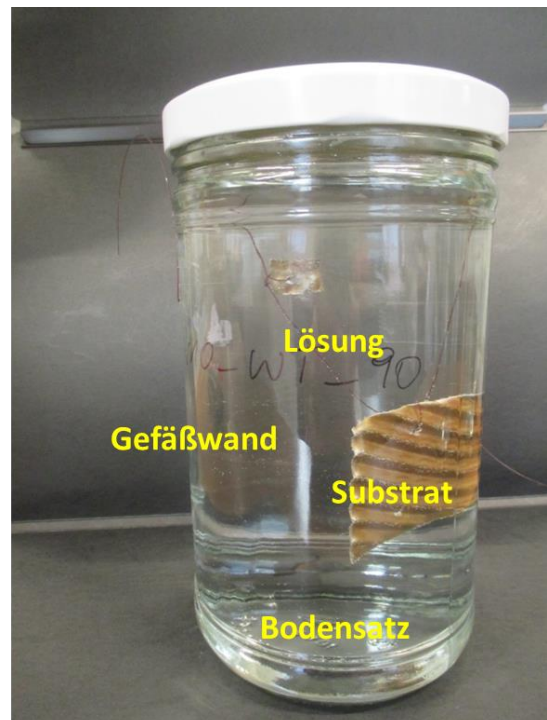
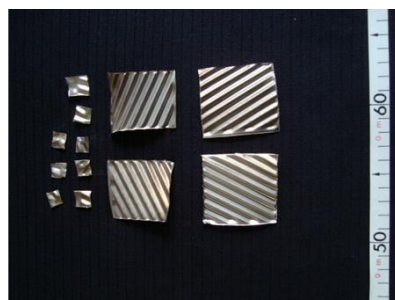


Abbildung 10: Übersicht über die durchgeführten Ausfällungsexperimente

Versuchsreihe 1, bestehend aus insgesamt 9 Reaktionsgefäßen mit den Substraten rostfreier und verzinkter Stahl und Polyamidringen plus 3 Blindversuche, wurde bei 40, 60 und 80°C ± 1°C mit einer Versuchsdauer von 27 Tagen durchgeführt. Versuchsreihe 2 lief ebenfalls für insgesamt 9 Reaktionsgefäße mit den Substraten verzinkter Stahl, Wärmetauscherblech, Hartgummiringen (Abbildung 11) und 3 Blindversuchen bei Temperaturen von 30, 60 und 90°C ± 1°C und einer Versuchsdauer von 50 Tagen. Nach Ablauf der Versuchsreihen wurden die Lösungen filtriert und die jeweiligen Festphasen (auf Substrat, Filtrat, Bodensatz, Gefäßwand) und Lösungen für die weiteren Analyseschritte (z.B. IC, ICP-OES, XRD, REM) aufbereitet.



Rostfreier und verzinkter Stahl



Wärmetauscherplatte, Firma Tranter aus Aluminiumblech



Kunststoffe: Polyamidscheiben und Hartgummiringe

Abbildung 11: Verwendete Substrate aus Versuchsreihe 2; (a) verzinkter Stahl, (b) Wärmetauscherblech der Firma Tranter und (c) Hartgummiringe.

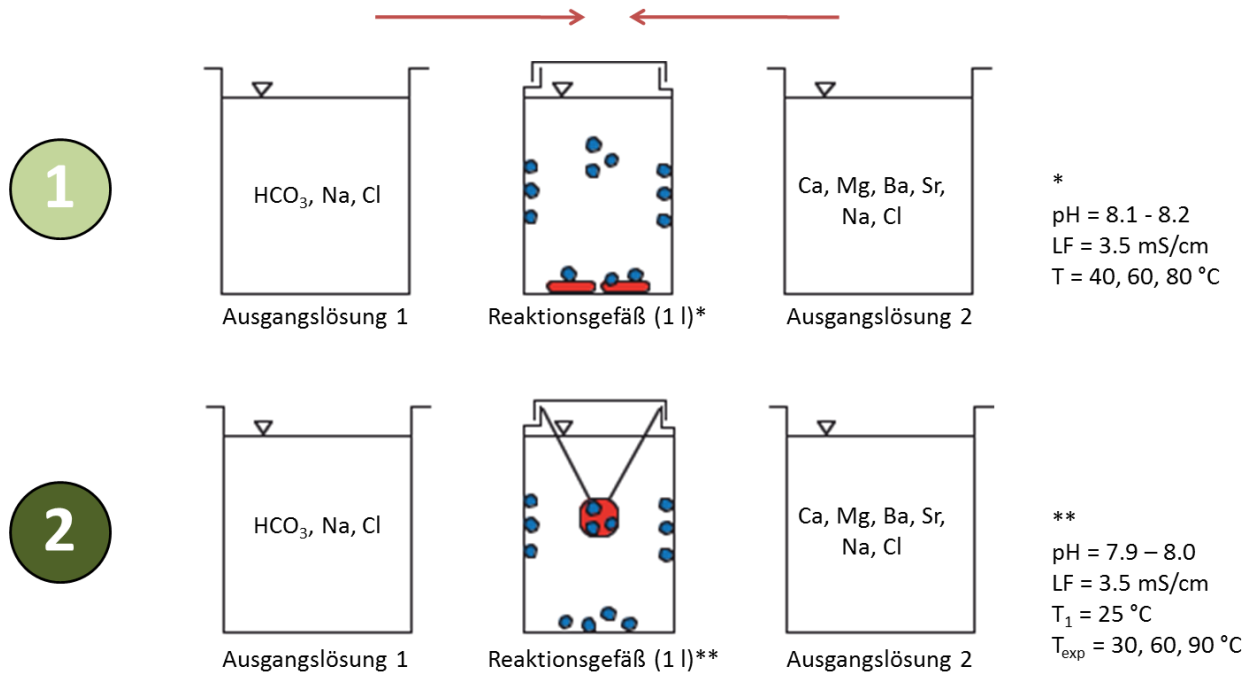


Abbildung 12: Aufbau von Laborversuchen (Versuchsreihe 1 und 2) zur Simulation von Ausfällungs- und Abscheidungsprozessen aus einer wässrigen Lösung (Bodensatz und Filtrat), an unterschiedlichen Substraten (rot) bzw. Oberflächen des Reaktionsgefäßes unter verschiedenen Temperaturbedingungen.

ad ii.:

Die hydrochemische Analyse der residualen Lösungen ergab, unabhängig vom gewählten Substrat und der Temperatur, eine deutliche Abnahme der Ca und HCO_3 -Konzentration, wobei sich die Abnahme der Konzentration mit zunehmender Temperatur ausgeprägter zeigte (Abbildung 13). Eine Abnahme der Mg-Konzentration mit steigender Temperatur konnte ebenfalls beobachtet werden, allerdings nicht im gleichen Maße wie für Ca. Die Folge hiervon war eine Zunahme des Mg/Ca-Verhältnisses in der Lösung über den Reaktionsverlauf mit steigender Temperatur. Eine deutliche Abnahme von Sr konnte nur in den 80 bzw. 90°C Versuchen beobachtet werden.

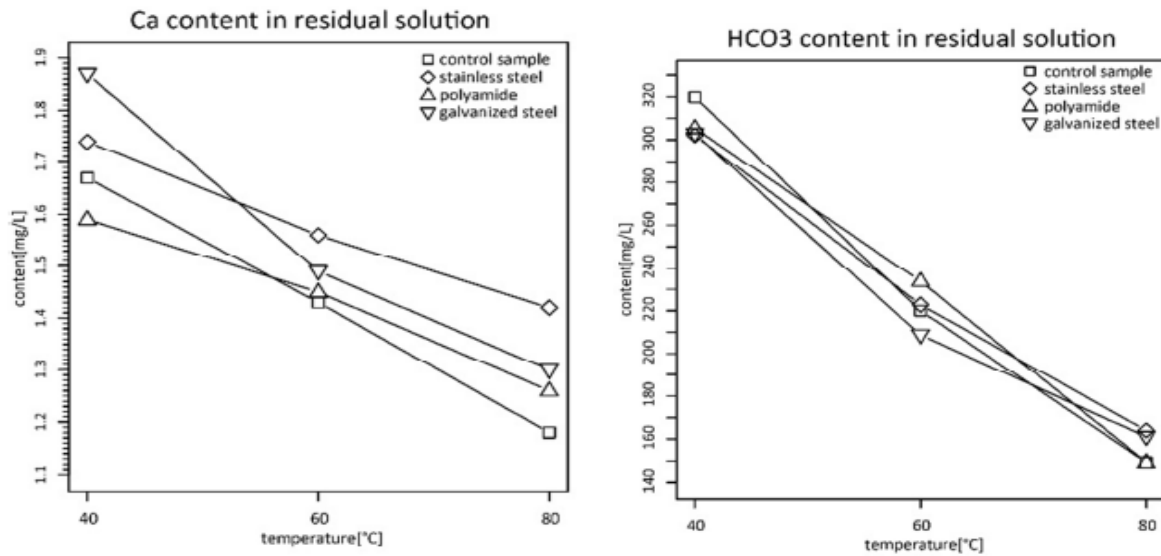


Abbildung 13: Ca- (a) und HCO₃-Konzentrationen (b) der residualen Lösungen für die unterschiedlichen Substrate und Temperaturstufen aus Versuchsreihe 1

Durch die mineralogische Analyse der Festphasen mittels XRD konnten die Karbonatphasen Kalzit, Mg-Kalzit, Vaterit und Aragonit in ihren unterschiedlichen Anteilen für den jeweiligen Versuch bzw. das jeweilige Substrat ermittelt werden (Tabelle 2). Die Versuche bei 40 °C zeichneten sich durch die ausschließliche Bildung von Kalzit aus, wohingegen in den Versuchen bei 60°C Mg-Kalzit gegenüber Kalzit überwog. Die Mineralparagenese der Versuche bei 90 °C war geprägt durch das Auftreten von Vaterit und Aragonit, neben Kalzit und Mg-Kalzit. Der Vergleich der versuchsspezifischen Ergebnisse zeigte außerdem, dass Kunststoffsubstrate die Bildung des metastabilen Karbonatpolymorphs Vaterit positiv beeinflussten.

Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung der Festphasen bei unterschiedlichen Materialien und Temperaturstufen

Blindversuch	40°C	Cal				
	60°C	Cal (35)	Mg-Cal (65)			
	80°C	Cal (28)	Mg-Cal (32)	Vat (10)	Arag (30)	
Rostfreier Stahl	40°C	Cal				
	60°C	Cal (32)	Mg-Cal (67)			
	80°C	Cal (28)	Mg-Cal (64)	± Vat	Arag (8)	
Kunststoff	40°C	Cal		± Vat		
	60°C	Cal (34)	Mg-Cal (60)	Vat (6)		
	80°C	Cal (23)	Mg-Cal (35)	Vat (34)	Arag (9)	
Verzinkter Stahl	40°C	Cal				
	60°C	Cal (45)	Mg-Cal (51)	Vat (4)		
	80°C	Cal (37)	Mg-Cal (26)	Vat (4)	Arag (32)	Zn-CaCO ₃ (1)

Abbildung 14 zeigt hochauflösende Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Karbonatpolymorphe (Mg-)Kalzit, Aragonit und Vaterit. Kalzit und Mg-Kalzit kamen in verschiedenen Ausprägungen vor, meist körnig, aber auch als scharf abgegrenzte Rhomboeder, außerdem häufig porös und skelettartig gewachsen (Abbildung 14a). Aragonit bildete häufig wirrstrahlige Aggregate aus feinen Nadeln (Abbildung 14b). Vaterit, als Indiz für eine zeitweise hohe Übersättigung, lag meist in Form hexagonaler Scheiben vor. Die ausgeprägten Porenstrukturen deuten auf eine potenzielle Wiederauflösung des Vaterits zu Gunsten der Bildung z.B. der unter den gewählten Bedingungen stabileren Kalziumkarbonat-Modifikation Kalzit hin (Abbildung 14c).

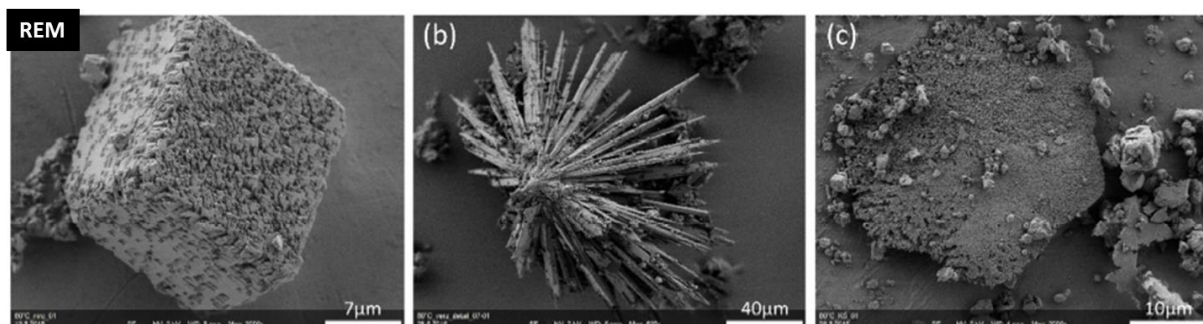


Abbildung 14: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der einzelnen angetroffenen in den Experimenten gebildeten karbonatischen Mineralphasen, (a) Kalzit, (b) Aragonit und (c) Vaterit

Die Untersuchung der Korngrößen mittels Auswertung der Kornlängen im REM-Bild ergaben für Kalzit eine leichte Zunahme in der Korngröße von 40 °C nach 60 °C und eine Abnahme in der Korngröße, wenn weitere Phasen, wie Vaterit oder Aragonit gebildet wurden. Die Aragonitnadelchen waren ca. 80 - 90 µm lang, nur im Fall der Versuch mit Kunststoffen als Substrat waren die Kristalle deutlich kleiner (< 50 µm). Für Vaterit konnte eine Zunahme der Korngrößen mit steigender Temperatur beobachtet werden.

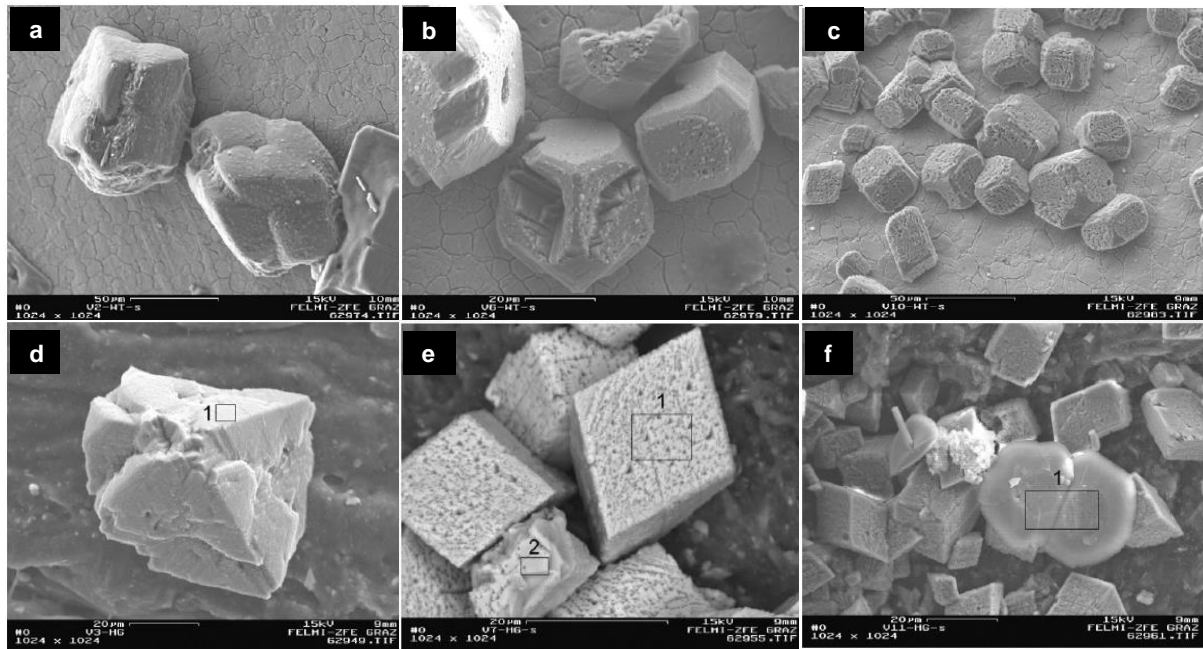


Abbildung 15: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des am Wärmetauscherblech (a-c) bzw. Hartgummi (d-f) abgeschiedenen (Mg-) Kalzits bei 30°C (a+d), 60°C (b+e) und 90°C (c+f). Auffällig sind die unterschiedlichen Kristallformen

Die substratspezifische Auswertung zeigte, dass am Wärmetauscherblech unabhängig von der Temperatur ausschließlich Kalzitkristalle abgeschieden wurden (Abbildung 15 a-c). Von 30°C zu 60°C konnte bei ähnlicher Korngröße (ca. 40 - 50 µm) eine Änderung der Kornform bzw. der Ausprägung beobachtet werden (Abbildung 15 a+b). Insbesondere traten skelettförmige Kristalle auf. Im Versuch bei 90 °C zeigten sich die skelettartigen Hohlräume der Kalzitkristalle gefüllt, aber mit relativ poröser Struktur und die Kristallgröße war etwas geringer (Abbildung 15 c). Die auffallende Porosität wurde als Hinweis für hohe Fällungsraten gedeutet. Am Kunststoff (hier Hartgummi) wurde unabhängig von der Temperatur nur Kalzit abgeschieden (Abbildung 15 d-f), ebenfalls mit unterschiedlichen Kornformen. Während die Kalzitkristalle bei 30°C eher unregelmäßige Kornformen zeigten (Abbildung 15 d), bildeten sich bei 60 und 90°C poröse Kalzit-Rhomboeder aus (Abbildung 15 e+f).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Temperatur ein wichtiges Kriterium der Abscheidungs- und Ausfällungsmechanismen darstellt. Die Temperatur bestimmt die Menge an ausgefällten Festphasen, die Korngröße, die Kornformen und die

Mineralvergesellschaftung. Die hohe intrakristalline Porosität, insbesondere bei den höheren Temperaturen, deutet auf hohe Fällungsraten und schnelles Kristallwachstum hin. Das Substrat hat einen geringeren Einfluss. Jedoch scheint insbesondere im Beisein organischer Kunststoffe die Vateritbildung bereits bei geringeren Temperaturen begünstigt zu sein. Wichtig ist jedoch die Oberflächenbeschaffenheit des Substrats, da hierdurch die Keimbildung und somit das weitere Kristallwachstum deutlich beeinflusst werden kann. Diese Beobachtungen erlauben somit den Rückschluss, dass die Temperaturentwicklung in einem geothermalen System von großer Bedeutung für die Abscheidungsmechanismen und – kinetik von Karbonatmineralen ist. Ferner induzieren die eingesetzten Materialien unterschiedliche Abscheidungsverhalten von Kalziumkarbonat-Modifikationen. Eine wesentliche Erkenntnis der Experimente war ferner, dass das Abscheidungsverhalten über die Relativgehalte der in den Wässern gelösten Kationen Mg, Sr und Ca geprägt ist bzw. beobachtet werden kann. In jedem Fall liefern derartige experimentelle Vorstudien wichtige Erkenntnisse über das zu erwartende Ausfällungsverhalten von Karbonatmineralen und die Auswahl von geeigneten Materialien für die entsprechende geothermale Applikation.

3.2.2 Untersuchungen zu Wasser-Gesteins-Interaktionen

Die Gehalte an chemischen Elementen in Grundwässern hängen stark vom Aquifergestein, der Verweildauer im Untergrund, den Zeiträumen für Wasser-Gesteins-Interaktionen und den physikochemischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Interaktionen ab. Dies erklärt auch, warum die hydrochemische Zusammensetzung von Wässern aus derselben Gesteinsformation und in relativ naher geografischer Nähe oftmals unterschiedlich sein kann. Daraus ergeben sich auch Unterschiede, ob in einer Geothermalanlage Ausfällungen auftreten und in einer anderen nicht.

Um die Prozesse für die hydrochemische Zusammensetzung von Grundwässern durch Wasser-Gesteins-Interaktionen besser zu verstehen, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt. Der Versuchsaufbau für die Wasser-Gestein-Interaktionsversuche ist in den Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Es wurden fünf verschiedene Granite und Gneise beprobt, zerkleinert und vermahlen und in Rührreaktoren verschiedenen CO₂-Partialdrücken und Redoxbedingungen ausgesetzt, um die jeweilige Reaktionskinetik bei verschiedenen Bedingungen zu analysieren und anschließend mit der Modellierung zu vergleichen.

Die Arbeiten werden über die Projektlaufzeit hinaus im Zuge einer Dissertation von Herrn Daniel Elster, MMSc. (AIT und Geologische Bundesanstalt) durchgeführt. Die Dissertation wird von der TU Graz (Univ.Prof. Dr. Martin Dietzel, Institut für Angewandte Geowissenschaften) und dem AIT Austrian Institute of Technology (DI Dr. Edith Haslinger, Energy Department) betreut und hat den Titel: „Hydrochemical and isotopic evolution of aquifer solutions from crystalline rocks with focus on Uranium“. Die Dissertation ist noch im Gange und wird im Frühjahr 2018 abgeschlossen werden.

Für die Laboruntersuchungen aus unterschiedlichen Graniten wurden 2 L DURAN GLS 80 Rührreaktoren mit Flügelrührern verwendet (Material: PP, PTFE, PEEK und Edelstahl). Die Flügelrührer wurden mit einem 6-fach Magnetrührer bei 80 bis 100 rpm. betrieben. Das Setup bestand aus sechs Rührreaktoren, um das Löslichkeitsverhalten von fünf Gesteinen und einer Leerprobe (kein Feststoff) simultan bei gleichen Bedingungen zu untersuchen. Der Feststoff wurde in Pulverform (Oberflächenbestimmung mit BET) beigefügt, als Lösungsmittel diente Reinstwasser (Milli-Q, 0,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Das Verhältnis von Feststoff zu Lösung betrug 1:10 bzw. 0,180 kg Feststoff zu 1,8 kg Lösung. Die Rührreaktoren wurde mit einem Gasgemisch von 15 Vol.-% CO_2 und 85 Vol.-% N_2 kontinuierlich begast. Dem einstufigen Druckminderer der Gasflasche (200 bar) wurde ein auf das Gasgemisch kalibrierter thermischer Massendurchflussregler nachgeschaltet. Somit konnte die Gaseinleitungsrate exakt kontrolliert werden (0,15 nl/min). Das Gas wurde anschließend zwecks Benetzung mit Reinstwasser durch eine Gaswaschflasche aus Borosilikat 3.3. und PTFE geleitet. Die Verteilung des Gasgemisches auf die einzelnen Reaktoren erfolgte mit gasdichten Schläuchen. Für die Begasung der einzelnen Rührreaktoren wurden PTFE-Gaseinleitungsrohre verwendet. Mit dem hydrochemischen Modellierungs-Programmcode PHREEQC wurde ein initialer pH-Wert von 4,3 für die begaste Lösung vor Zugabe des Feststoffes berechnet. Die Entnahme der Proben erfolgte über PTFE-Schläuche.

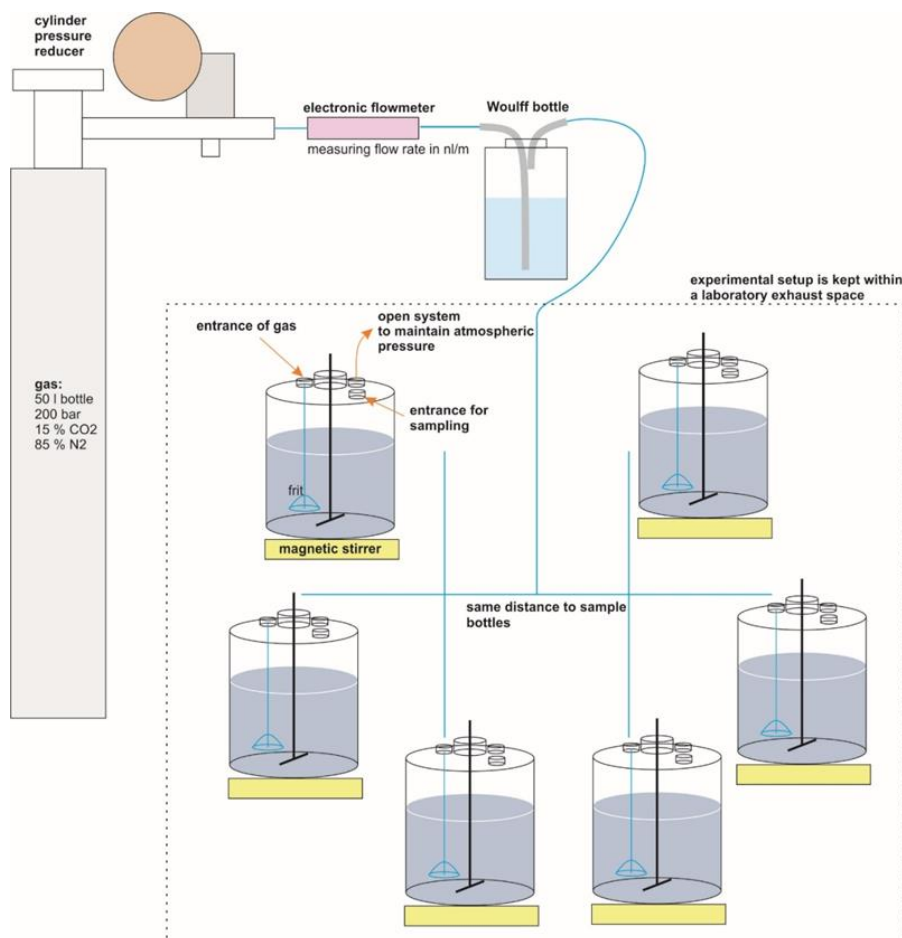


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zu Wasser-Gesteins-Interaktionen (Details im Text).



Abbildung 17: Foto des Versuchsaufbaus zu Wasser-Gesteins-Interaktionen

Bei den Versuchsreihen WR 1 (31,5 h Laufzeit) und WR 2 (24 h Laufzeit) wurden bei allen Granittypen schnelle Reaktionszeiten beobachtet. So stiegen die pH Werte innerhalb von rund 30 min auf 5,5 bis 6,7 an (siehe Abbildung 18). Dieser geringe Zeitraum des pH-Anstiegs ist auf das unalterierte und daher reaktive Material (typisches Verwitterungsverhalten von silikatischem Material) und die hohen spezifischen Oberflächen zurückzuführen (1,5 bis 2,3 m²/g). Anschließend wurden nur geringe pH-Zunahmen beobachtet. Die hydrochemische Modellierung zeigte, dass bei den gewählten Versuchsbedingungen Hydrogenkarbonat für die Bildung von Aquakomplexen mit Uran bedeutend ist. Zudem war Aluminiumhydroxid stets übersättigt. Eisen konnte nur bei zwei Granittypen in den ersten Stunden in der Reaktionslösung nachgewiesen werden. Insgesamt spiegeln sich die Uran-Konzentrationen (3,5 bis 23,5 ppm) der Ausgangsgesteine nicht in den wässrigen Lösungen der jeweiligen Versuche (0,2 bis 1,5 µg/l) wider. Es ist zu vermuten, dass insbesondere die mineralogische Zusammensetzung und die jeweilige Anbindung des Urans im eingesetzten natürlichen Gestein für die Mobilisierung von Uran entscheidend sind (Zirkon, Monazit und Thorit).

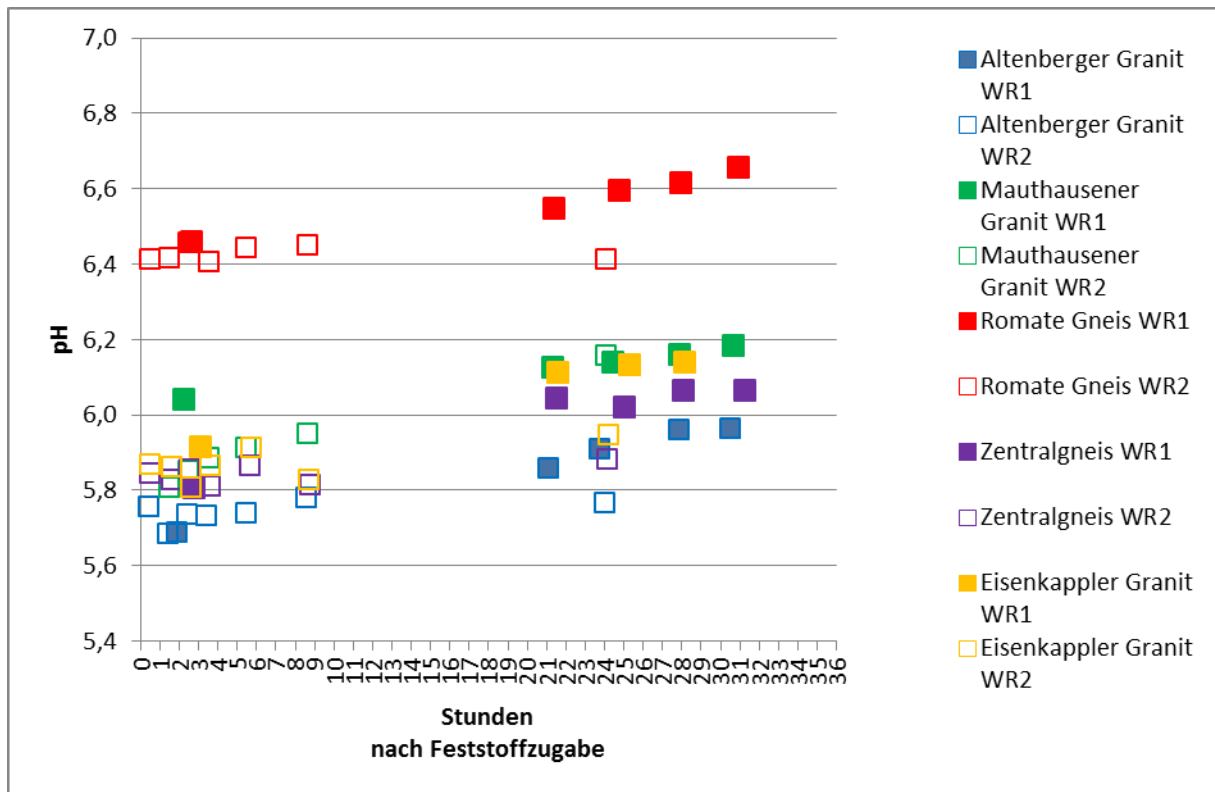


Abbildung 18: pH Wert Entwicklungen über die Dauer der Versuchsreihen WR 1 und WR 2 (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 16)

Die Ergebnisse brachten bisher wichtige Erkenntnisse bezüglich der unterschiedlichen Wasser-Gesteins-Interaktionen und der unterschiedlichen Freisetzungsraten von chemischen Elementen aus den untersuchten Gesteinen. Die Kinetik der Freisetzung von einzelnen Elementen über den zeitlichen Verlauf wurde begleitend modelliert – siehe Punkt II. Simulation von Wasser-Gesteins-Interaktionen (PHREEQC).

Diese Erkenntnisse unterstützten eine der abschließenden Feststellungen, dass Ausfällungen in demselben Aquifergestein in manchen Anlagen zu Problemen führen, in anderen – teilweise geografisch nicht weit voneinander entfernten – Hydrogeothermialanlagen nicht. Die mineralogisch-chemische Zusammensetzung des Aquifergesteins im Zusammenspiel mit thermodynamisch-kinetischen Modellierungen, wie sie in AP 4 durchgeführt wurden, liefert eine wichtige Voraussetzung für die Prognose von Ausfällungen von Festphasen in einer Geothermieanlage. Mit diesen Kenntnissen können auch Empfehlungen für die Betriebsbedingungen einer Anlage ausgesprochen werden, womit im besten Fall Ausfällungen verhindert und/oder verringert werden können.

3.2.3 Fallstudie Versinterung in Rohren und auf Wärmetauschern

Die bei einer Anlage angetroffenen massiven Ausfällungen (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6) sowie die physikochemischen Prozesse, die zu diesen schnell gewachsenen Ausfällungen geführt haben, wurden im Rahmen einer anlagenspezifischen Fallstudie mittels umfassender mineralogischer und geochemischer Analysen untersucht.

Konkret wurden folgende Untersuchungen an den Ausfällungen durchgeführt, die im Folgenden kurz erläutert werden:

i. Makroskopisch-petrografischer Befund

Die Ausfällungsproben wurden makroskopisch, d.h. nach ihrem Aussehen im Handstück beschrieben. Die scherbenartigen Proben aus Förderrohren und als zementierte Blöcke auf Plattenwärmetauschern zeigen eine auffallend dunkle (grau bis schwarz) Färbung und teilweise einen glasigen Glanz aufgrund ausgeprägter Kristallflächen. Mit freiem Auge sind rhomboedrische Kristallflächen zu erkennen und die raue Oberfläche der Scales ist ein Resultat davon. Die Ablagerungen sind relativ kompakt und weisen eine geringe Porosität auf.

ii. Röntgendiffraktometrie (XRD) – Mineralbestand

Die XRD-Untersuchungen zeigten, dass die scherbenartigen Ausfällungen hauptsächlich aus Mg-Kalzit mit einem Gehalt von 5 - 8 mol% MgCO₃ im Kalzit bestehen. Die Röntgenspektren belegen die hohe Kristallinität der Mg-Kalzite.

iii. Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) – Haupt-, Neben-, Spurenelemente

Die RFA-Analysen der karbonatischen Ausfällungen, basierend auf Schmelztabletten (Haupt-/Nebenelemente) und Pulverpresstabletten (Spurenelemente) mehrerer Proben, zeigten folgende typische chemische Zusammensetzung:

Haupt- und NebenkompONENTEN	Spurenelemente in erhöhter Konzentration
CaO, CO ₂	Cu bis 1250 ppm
MgO	Mn bis 350 ppm
Fe ₂ O ₃ , SO ₃ ,	Zn bis 180 ppm
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Sr,	Sn bis 90 ppm
Cu, Zn, Ni, MnO	Ni bis 60 ppm
	Cr bis 35 ppm

Die XRD- und RFA-Analysen ergaben folgende typische Zusammensetzung einer abgeschiedenen Festphase:

- 97 Gew.% Mg-Kalzit (91 Gew.% CaCO_3 , 6 Gew. % MgCO_3); ev. andere Karbonatanteile (Sr, Ba) < 1 Gew.%
- 1 Gew.% Sulfide (0.8 Gew.% FeS, 0.03 Gew.% CuS, u.a.)
- 2 Gew.%: SiO_2 ,
- organische Komponenten (z.B. Kohlenwasserstoffe)

iv. Extraktion der nichtkarbonatischen Anteile in den dunkel gefärbten Scales

Um herauszufinden, welche nicht-karbonatischen Anteile in den Scales vorhanden sind und vermutlich deren Färbung bewirken, wurden 2 - 6 g Probe mit 2-molarer HNO_3 versetzt, um das Karbonat vollständig aufzulösen. Die Reaktionszeit betrug hierbei 24 h.

Anschließend wurde der gefilterte Rückstand mineralogisch untersucht (Abbildung 19). Die Ergebnisse der XRD-Analysen zeigten folgende Zusammensetzung:

Hauptphasen		Nebenphasen	
FeS	Pyrrhotin, magnetisch	Fe_3O_4	Magnetit
CuFeS_2	Chalkopyrit	CuS	Covellin
ZnS	Sphalerit	NiS	Millerit
		SiO_2	Quarz, Kieselsäure

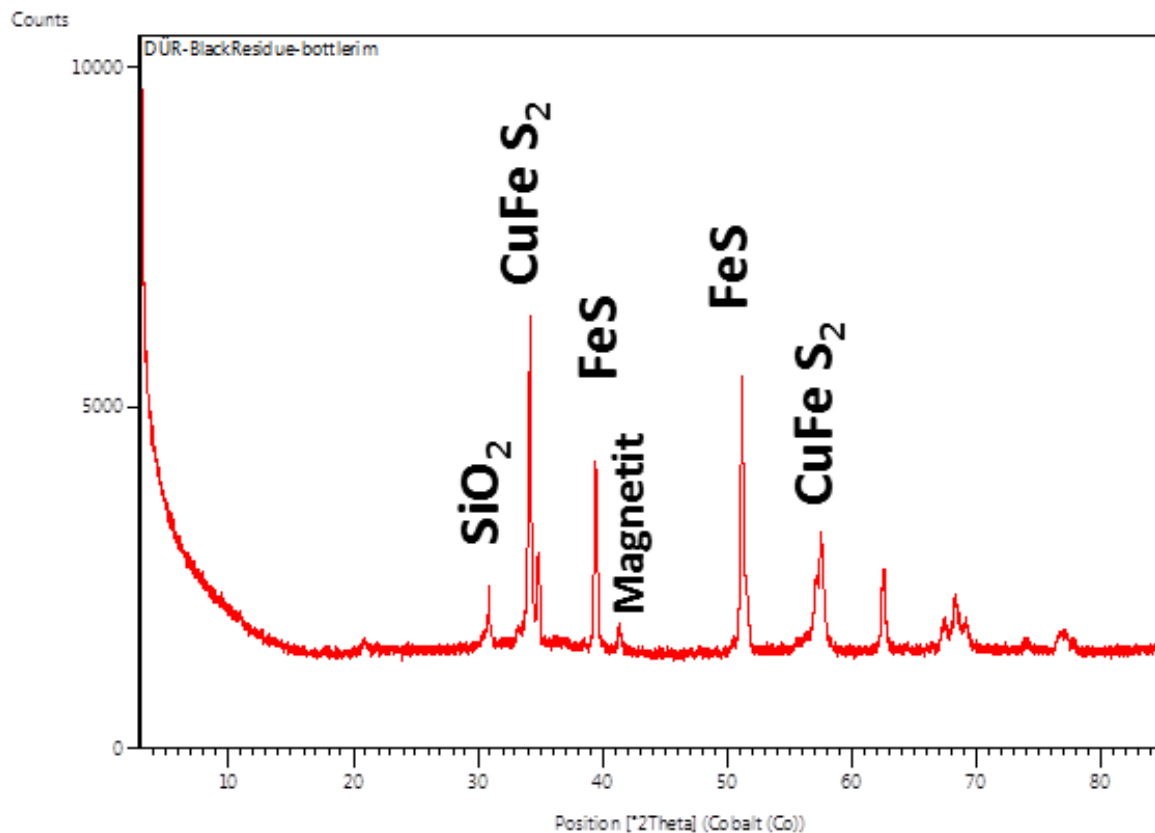


Abbildung 19: Typisches Röntgendiffraktogramm der Residualphasen nach Auflösen des Karbonats

Die Mineralparagenese aus verschiedenen Metall-Sulfiden deutet auf reduzierende Redoxbedingungen in dem abscheidenden Thermalwasser hin. Des Weiteren wurden die extrahierten Rückstände aus den Abscheidungen mittels ATR-FT-IR (Infrarotspektroskopie) analysiert. Die Spektren zeigten typische Absorptionsbanden von Mg-Kalzit und außerdem einen Hinweis auf zusätzliche C-H-Valenzschwingungen (Methylgruppen), welche den geringen Kohlenwasserstoff-Anteil in den dunklen Scales widerspiegeln.

v. Mikroskopische Untersuchung der Kontaktfläche Stahlrohr - Karbonatscale

Einige Scale-Scherben und an Wärmetauschern zementierte Bruchstücke wurden als Dünnschliffe lichtmikroskopisch untersucht. In praktisch allen Fällen sind an der Scale-Basis im Durchlicht auffallend dunkle Lagen variabler Dicke vorhanden. Diese werden als reliktsche Korrosionslagen der Stahloberfläche (Förderrohre) interpretiert. Auf diesen mineralischen Korrosionslagen findet offensichtlich ausgeprägte Nukleation und Kristallwachstum von Mg-Kalzit statt, wobei die einzelnen Kristalle kolumnar-kompetitiv wachsen und ein kompaktes, wenig poröses Gefüge bedingen. Auf einigen vermutlich teils losgelösten Korrosionslagen findet die Nukleation bi-direktional statt, d.h. die Kristallite

wachsen in verschiedene Richtungen. Einzelne meist deutlich dünnere, dunkle Lagen variabler Dicke wurden auch innerhalb der kalzitischen Scales beobachtet. Vermutlich handelt es sich um gelegentliche, verstärkte Einschwemmungen hauptsächlich durch sulfidische Stahlkorrosion entstandener Korrosionsprodukte, etwa nach Betriebsstillstandzeiten mit anschließender Mobilisierung. Auch ein mikrobieller Beitrag zur Bildung solcher Lagen (beschleunigte Korrosion vs. Fällung) kann bisher nicht ausgeschlossen werden. Die gemachten Beobachtungen legen jedenfalls eine wesentliche Bedeutung korrodierter Oberflächen und damit einhergehender Korrosionsprodukte für den Beginn und die weitere Entwicklung der Kristallisation, also die Wachstumsdynamik karbonatischer Scales nahe. Solche Grenzflächen sind sehr wahrscheinlich ein attraktives Substrat mit Blick auf die Entwicklung von Scaling.

vi. Mikrosonden-Analysen der Korrosionslage

Die basale Kontaktfläche zwischen Karbonat-Scale und Stahlrohr wurde auch mittels Elektronenstrahl-Mikrosonde (EPMA) räumlich hochauflösend untersucht. Es wurden Elementkartierungen und BSE-Aufnahmen (Back-Scattered-Electron-Aufnahmen) ausgesuchter Bereiche durchgeführt. Für den karbonatischen Teilbereich (Scale) wurde eine chemische Zusammensetzung als Mg-Kalzit bestätigt. Für die basale Korrosionslage ergab sich eine chemische Zusammensetzung aus den Elementen Eisen, Schwefel und untergeordnet Silizium. Es handelt sich sehr wahrscheinlich um sulfidische Korrosionsprodukte des Stahls, sowie einen Beitrag (durch Fällung oder Adsorption) von amorpher oder teilweise kristallisierter Kieselsäure. Die relativ hohen H_2S -Gehalte der Thermalwässer (bis 35 mg/l), der verwendete Stahl (unlegiert), wie auch die weiteren korrosiven Bestandteile der geförderten Wässer (relativ viel CO_2 und Chlorid, hohe Temperaturen) können die chemische Zusammensetzung und mineralogische Ausprägung der gefundenen Abscheidungen erklären. Die analytisch belegten Mineralphasen stimmen sehr gut mit den hydrochemischen Modellierungen basierend auf dem Programmcode PHREEQC überein. Einige mineralogisch-kristallographisch charakteristische Eigenschaften der beobachteten Korrosionslagen (z.B. hohe spezifische Oberfläche) begünstigen tendenziell die Karbonatnukleation. Von großer Bedeutung ist außerdem die Sprödigkeit und verringerte mechanische Widerstandsfähigkeit (Schwächezone) dieser basalen Korrosionsoberflächen. Dies begünstigt ein lokales Abscheren und Abplatzen von Scale-Scherben mit der Zeit.

vii. Durchlicht- und Elektronenmikroskopische Untersuchung der Grenzfläche Scale vs. Fluid (Thermalwasser)

Bildgebende Analysemethoden zeigen meist auffallend große, rhomboedrische Kristallspitzen an der Wachstumsoberfläche der untersuchten karbonatischen Scales. Diese raue Oberfläche als Grenzfläche zum vorbei strömenden thermalen Fluid bedeutet einen erhöhten Strömungswiderstand, was ein lokales Abplatzen von Scale-Scherben bei

anhaltender Belastung weiter begünstigt. Vermutlich hat die raue Topographie auch einen Effekt auf die Strömungseigenschaften, etwa auf das Auftreten von Turbulenzen im Kleinstbereich (mikroskopische Verwirbelungen) und damit verbunden auf das Entgasen von CO_2 und H_2O an der Grenzfläche und folglich auch auf die Fällungsdynamik der Karbonatscales.

viii. Vergleich mit Ausfällungsexperimenten in Glasbehältern

In mehrerer Hinsicht stimmen die Beobachtungen aus den mineralogischen und chemischen Analysen der Karbonatscales mit den experimentellen Befunden überein. So zeigte sich in den Glasreaktoren mit synthetischem Thermalwasser variabler physikochemischer Parameter nach sieben Wochen Reaktionszeit auf verzinkten Stahloberflächen eine raue, dicht verwachsene Scaleoberfläche aus Kalzitrhomboedern und untergeordnet das kugelige Zinkkarbonat-Mineral Hydrozinkit. Bei 90 °C und relativ hohen Chloridkonzentrationen war außerdem starke Korrosion der Stahloberfläche mit stellenweisem Abplatzen zu beobachten. Die Experimente stützen somit eine Interpretation begünstigter Kalzitnukleation und Kristallwachstums in Verbindung mit ausgeprägter Korrosion des Substrats, sowie die Bedeutung von Korrosionslagen als chemisch-mechanische Schwächezone und wichtige Voraussetzung für mögliche Abplatzungen von Scale-Fragmenten.

Zusammenfassung zu den Erkenntnissen aus der Fallstudie:

- Karbonatscaling & Korrosion sind oftmals eng miteinander verknüpft und können folgenschwere Auswirkungen beim Betrieb geothermaler Anlagen haben (Beispiel "Scherbenbildung an Wärmetauschern").
- Bedeutung der Materialauswahl → kostengünstige Stahlrohre vs. Beschichtungen, Legierungen, etc.
- Die hydrogeologische Erschließung von Störungszonen bedeutet mitunter Vorteile & Nachteile → hohe Schüttung vs. tlw. problematische Hydrogeochemie (z.B. Förderung von rel. viel CO_2 , H_2S , u.a.).
- Experimentelle Befunde sind eine wertvolle Ergänzung zu empirisch-analytischen Ansätzen für die Untersuchung und Prognose von Abscheidungen in Geothermieanlagen.
- Mit Hilfe moderner geochemisch-analytischer Verfahren lassen sich Scaling- und Korrosions-Prozesse Anlagen-spezifisch untersuchen und erklären.

3.3 Modellrechnungen und Simulationen der Auswirkungen der Nutzung von Thermalwasser in Geothermieanlagen

3.3.1 Modellierungen des Lösungsverhaltens der Wässer in unterschiedlichen Thermalanlagen (PHREEQC)

Für alle untersuchten Hydrogeothermialanlagen wurden Modellierungen der Sättigungsindizes von Feststoffen für die jeweiligen Wässer durchgeführt. Die Sättigungsindizes geben darüber Auskunft, ob eine Mineralphase in Bezug auf die Lösung untersättigt ($SI < 0$), im Gleichgewicht ($SI = 0$) oder übersättigt ($SI > 0$) ist. Im Falle einer Übersättigung muss mit einem Ausfällen der Mineralphase gerechnet werden, außer die Ausfällung ist kinetisch gehemmt.

In Abbildung 20 ist beispielhaft das Ergebnis einer solchen Modellierung dargestellt. Die Grafik zeigt die chemisch-thermodynamische Modellierung der Ausfällungen in den Anlagen mit den massiven Ausfällungen in den Rohrleitungen und auf den Wärmetauschern (siehe Arbeitspaket 3, Fallstudie). Die mineralogische Analyse der Residualphasen nach Auflösen des Karbonats zeigte, dass die Phasen Pyrrhothin (FeS), Chalkopyrit ($CuFeS_2$) und Sphalerit (ZnS) vorhanden sind. Dies wurde im Zuge der hydrochemischen Modellierung mit PHREEQC in Hinblick auf Plausibilität überprüft. Laut den Ergebnissen der Modellierung sollten nur die Phasen Sphalerit und Chalkopyrit ausfallen und zwar nur 5 ng (Sphalerit) bzw. 4 ng (Chalkopyrit) pro Liter des Thermalwassers. Wenn man den Massenstrom der Anlagen und die Zeit der massiven Ausfällungen (14 – 17 Tage) berücksichtigt, kommt man zum Schluss, dass die laut Modellierung chemisch-thermodynamisch ausfallende Menge nicht zu solchen massiven Ausfällungen führen kann. Es mussten also noch andere Prozesse als rein chemisch-thermodynamische basierend auf der natürlichen Lösungszusammensetzung wirksam sein, etwa korrosive Mineralneubildungen und begünstigte Karbonatscaleabscheidung. Die weiteren Untersuchungen zu diesem Thema sind in den Ausführungen zur Fallstudie, in denen die Kontaktflächen von Rohrwand und Ausfällungen im Detail untersucht worden sind, beschrieben (siehe oben).

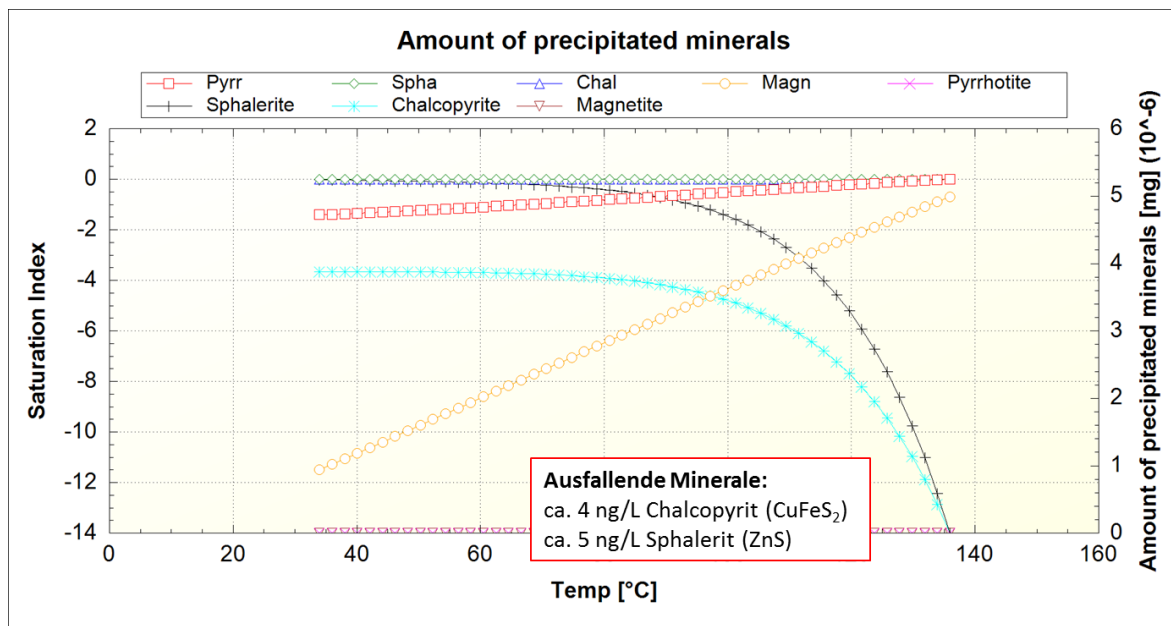


Abbildung 20: Modellierung der Menge der ausgefallenen Mineralphasen Chalcopyrit und Sphalerit der beiden Anlagen mit massiven Ausfällungen auf den Wärmetauschern. Auf der x-Achse ist die Temperatur aufgetragen. Die Temperatur von 138 °C entspricht der Aquifertemperatur und kühlt sich dann bei der Förderung sukzessive ab. Auf der primären y-Achse links ist der Sättigungsindex (engl. Saturation Index, SI) angegeben. Auf der sekundären y-Achse ist die ausfallende Menge der jeweilig aufgrund des mineralogischen Befunds der Ausfällungen untersuchten Mineralphase aufgetragen.

3.3.2 Simulation von Wasser-Gesteins-Interaktionen (PHREEQC)

Für die Untersuchung von Wasser-Gesteins-Interaktionen von Aquifergesteinen und die Auflösungskinetik von Feldspat wurde beim Projektpartner AIT der im Kapitel 3.2.2 erläuterte Versuchsaufbau, der im Rahmen einer Dissertation mitbetreut wird, aufgebaut. Neben der Modellierung der Anfangsbedingungen wurde auch die Auflösungskinetik einzelner Minerale mit PHREEQC modelliert, um die experimentellen Daten aus der Probennahme während des Versuchs mit den mineralogisch-thermodynamischen Ergebnissen von PHREEQC zum zeitlichen Verlauf der Auflösung von verschiedenen Graniten zu vergleichen.

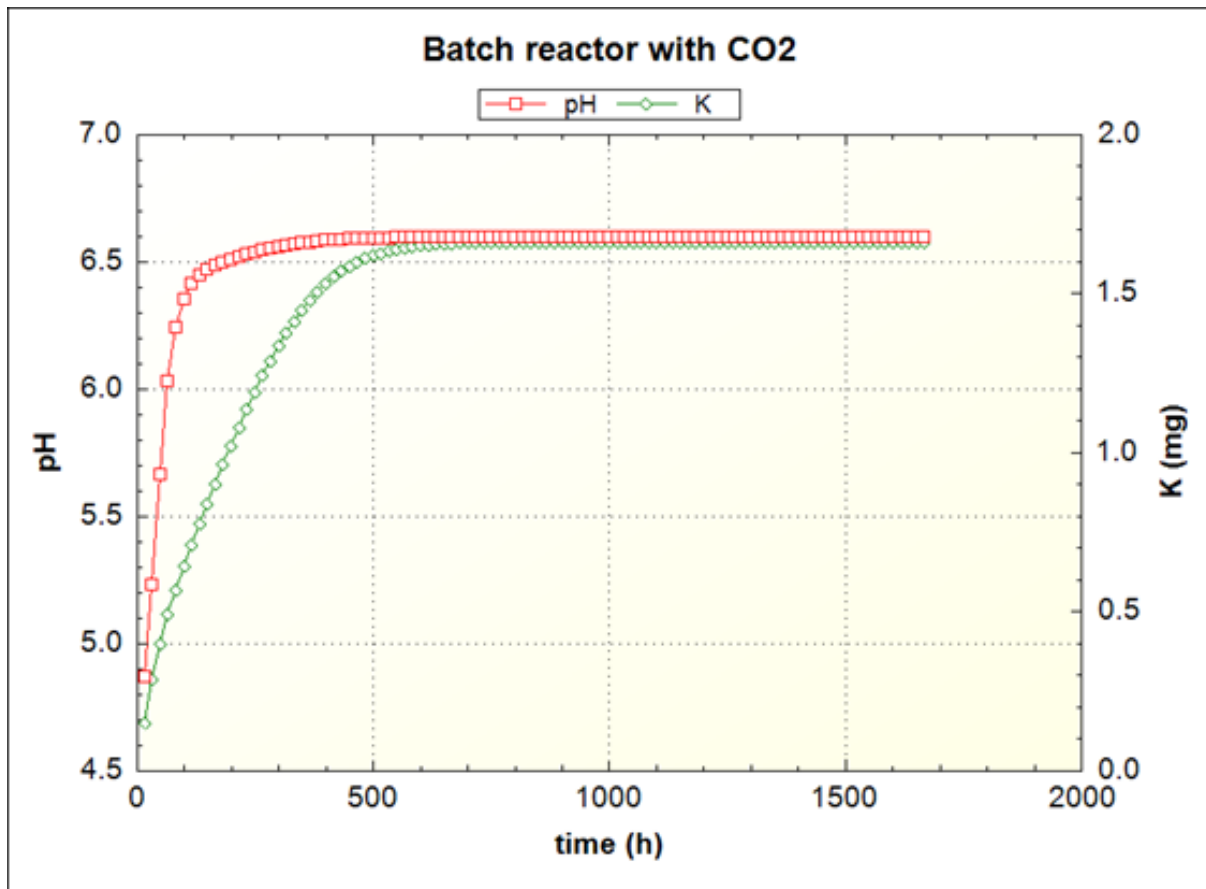


Abbildung 21: Auflösungskinetik von K-Feldspat in der mit CO₂ begasten Lösung. Auf der x-Achse ist die Zeit aufgetragen, an der man ablesen kann, wann sich – wie in diesem Fall – Gleichgewichtsbedingungen einstellen. Auf der primären y-Achse links ist der pH-Wert und auf der sekundären y-Achse rechts die Menge an durch Auflösung freigesetzten Kaliums aufgetragen.

Die Herausforderung bei der Modellierung war, die Dynamik der Gaslösung der wässrigen Phase und gleichzeitig die Kinetik der Auflösung von K-Feldspat zu erfassen. In Abbildung 21 sieht man, dass die pH-Wert-Änderung während der Auflösung des Feldspats im Modell recht gut nachvollzogen werden konnte (siehe Kapitel 3.2.2, Abbildung 18). Des Weiteren zeigt sich auch ein deutlicher Anstieg der K-Konzentration im Reaktionsverlauf. Wie das Modell zeigt, stellt sich nach ca. 500 h ein dynamisches Gleichgewicht von pH-Wert und K-Konzentration ein. Solche Berechnungen sind bei der Simulation von Wasser-Gesteins-Interaktionen von zentraler Bedeutung. Da die gegenständliche Dissertation noch im Lauf ist, werden die Simulationen weitergeführt. Für das Projekt NoScale waren die Simulationen wichtig als Startpunkt für die Prozesssimulationen – siehe gleich im Anschluss in 3.3.3 Prozesssimulation.

3.3.3 Prozesssimulation Frutura

Die Prozessmodellierung einer gesamten Hydrogeothermalanlage ist eine große numerische Herausforderung, da die Prozesse bei der Förderung von Thermalwasser vielfältig und komplex sind. Am Beginn wurden die Modellierungen mit allen drei zur Verfügung stehenden Programmcodes – PHREEQC, ASPEN/ FLUENT und COMSOL Multiphysics – probiert. Nach einigen Ansätzen stellte sich heraus, dass der Code PHREEQC am besten für Prozessmodellierungen geeignet ist. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, konnten mit PHREEQC alle wesentlichen Prozesse der Förderung des Thermalwassers numerisch nachvollzogen werden. Wie das Beispiel der CO₂-Entgasung während des Wassers in der Förderbohrung zeigt, konnte auch die Entwicklung eines Zweiphasengemisches aus CO₂ und Wasser im Modell nachvollzogen werden. Der Unterschied zu den anderen Tools liegt in der Einbeziehung der Peng-Robinson-Gleichung, welche nur in PHREEQC implementiert ist. Diese Gleichung beschreibt das bei hohen Drücken nicht-ideale Verhalten eines Gases. Erst durch die Anwendung der Peng-Robinson-Gleichung ist es möglich, realistische Simulationen zum Verhalten des Thermalwassers beim Aufstieg und in den obertägigen Anlagen durchzuführen. Dies zeigt die Leistungsfähigkeit des numerischen Modells für die Simulation hydrogeochemischer Fragestellungen in geothermischen Anlagen.

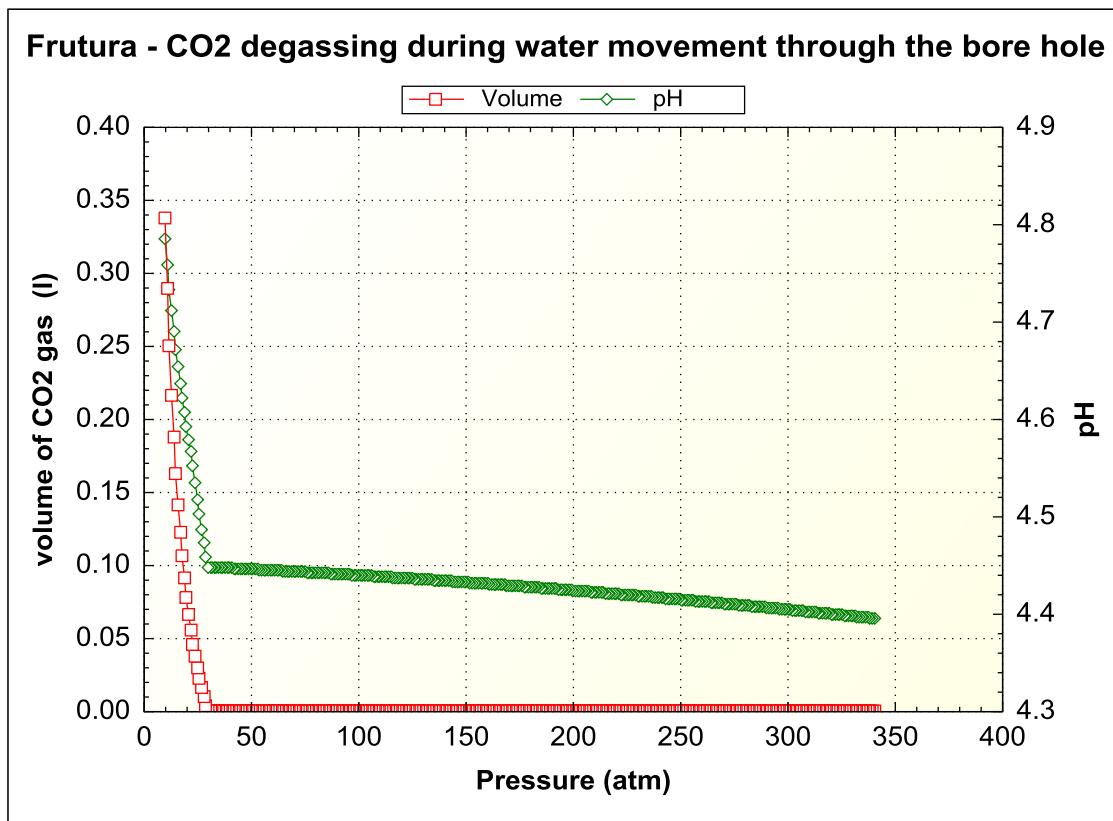


Abbildung 22: Simulation des Entgasens von CO₂ während des Aufstiegs des Thermalwassers in der Bohrung zur Oberfläche

3.3.4 Strömungssimulation Plattenwärmetauscher (FLUENT, Comsol)

Das Projekt NoScale wurde inhaltlich von Vertretern der Praxis teilweise begleitet, so auch von einem der größten Hersteller von Plattenwärmetauschern. Der Austausch mit dem Hersteller diente dazu, sich über Schwierigkeiten beim Betrieb von Plattenwärmetauschern im Bereich Geothermie zu informieren. Dabei wurde neben konstruktiven Details auch über die Schwierigkeiten informiert, die im Betrieb häufig auftauchen. Beim praktischen Betrieb von Plattenwärmetauschern werden folgende Schwierigkeiten identifiziert:

- Scaling durch Kalziumkarbonat,
- Eintrag von Feststoffen (Belag und Verstopfung),
- Biologisches Fouling,
- Einfrieren und
- Korrosion.

Folgende Maßnahmen werden gegen Fouling, Scaling und Korrosion angewendet:

- Druckverlust am maximal ökonomisch vertretbaren Betriebspunkt halten (Potential der Strömung),
- CIP-Reinigung,
- Einbau von Filtern, Sieben und
- Rückspülung.

Der Scalingvorgang selbst tritt in der Praxis immer flächig an der Wärmetauscherplatte auf. Bereiche mit geringerer Strömungsgeschwindigkeit (Druckgradient) werden darüber hinaus zu Ablagerungsflächen und Räumen geneigt sein. Zudem bilden sich durch Kapazitätsschwankungen einerseits zusätzliche Totzonen aus, die zu Ablagerungen neigen. Diese Ablagerungen - von Mikroorganismen und auch mineralischen Komponenten - führen zu erheblichen Schwierigkeiten im Betrieb der Wärmetauscher (Korrosion an den Dichtungen, Undichtheit). Allein durch die Erhöhung der Schubspannung an den Oberflächen im Wärmetauscher kann jedoch keine generell gültige Regel für die Reduzierung von Ablagerungen abgeleitet werden, da Ablagerungen auch spontan bei Überschreiten der Löslichkeit ausfallen. Fallabhängig spielt auch die Ausbildung der Plattenoberfläche eine Rolle.

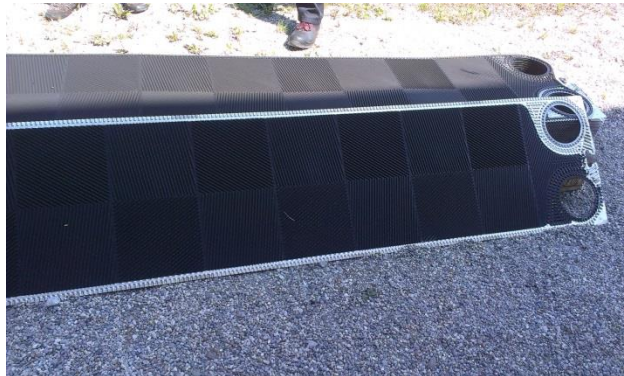


Abbildung 23: Wärmetauscherblech mit Scalingbelag, Rechts: Austritt von Natriumchlorid aus einem Wärmetauscher nach Kristallisation im Dichtungsbereich (Dichtung durch Kristallbildung schrittweise deformiert, zunehmende Undichtigkeit)

Um die Effekte der Strömungsmechanik auf die Belagsbildung klären zu können, wurde im Rahmen des Projekts NoScale eine Simulation der Strömungsmechanik in einem Plattenwärmetauscher durchgeführt. Es wurden die grundlegenden Zusammenhänge der Strömung und Wärmeübertragung in Plattenwärmetauschern mit Hilfe einer numerischen Strömungssimulation untersucht. Zum Einsatz kam eine numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichung (NSG) mit der Erhaltung von Masse, Energie und Impuls als Grundlage. Neben der Impulsgleichung wird bei einer solchen Simulation daher auch der Erhaltungssatz für die Masse und die Energie in Form von Wärme und turbulenter Dissipation gelöst (Verwirbelung von Energie führt zu Entropie). Die Lösung der NSG erfolgt nicht analytisch, wie das klassisch für exakt bestimmte Fälle und Randbedingungen möglich ist, sondern numerisch. Der zu simulierende Gesamtraum wird dabei in kleine, finite Elemente aufgeteilt. In jedem dieser kleinen Elemente werden die NSG und die Massen- und Energieerhaltung gelöst. Die Lösung wird jeweils an die Nachbarzellen als interne Randbedingung einer Rechnung übergeben, dort wird die Simulation von Zelle zu Zelle fortgesetzt. Der Vorgang der Unterteilung eines Raums in Zellen wird als "Meshen" bezeichnet. Es entsteht quasi ein dreidimensionales Netz aus Zellen. Die Qualität der Simulation hängt im Wesentlichen von dem CAD-Modell, der Feinheit des Netzes, dem verwendeten Elementtyp und den eingesetzten Modellen ab. Beim Zeichnen des Fluidraums im CAD-Programm sollten spitze Kanten vermieden werden, weil das die Anzahl an Zellen steigen lässt und die Winkel in den finiten Elementen dabei ungünstig werden können. Resultat ist dann ein nicht sinnvolles Ergebnis oder die Rechnung konvergiert gar nicht.

Im Falle eines Wärmetauschers wird das Wärmetauschermodell mit Hilfe von CAD gezeichnet und danach "ausgegossen". Der Typ und die Feinheit des Netzes sollte so gewählt werden, dass interessante Stellen höher aufgelöst werden können. Zu feine Netze erhöhen den Rechenaufwand und können zu instabilen Lösungen führen. Daher bedarf es Erfahrung, die Netze richtig zu generieren. Im vorliegenden Fall wurden aus Erfahrung

Tetraeder als Grundkörper gewählt. Die können danach noch polyedrisiert werden, was die Anzahl an Zellen noch weiter reduzieren kann. Auch die Randbedingungen und Methoden der Simulation sind wesentlich: Allen umgrenzenden Wänden werden Randbedingungen aufgegeben, strömungsmechanisch, das Material samt Eigenschaften oder auch in Hinsicht auf die Wärmeübertragung (No-slip, Rauigkeit; adiabat, etc.).

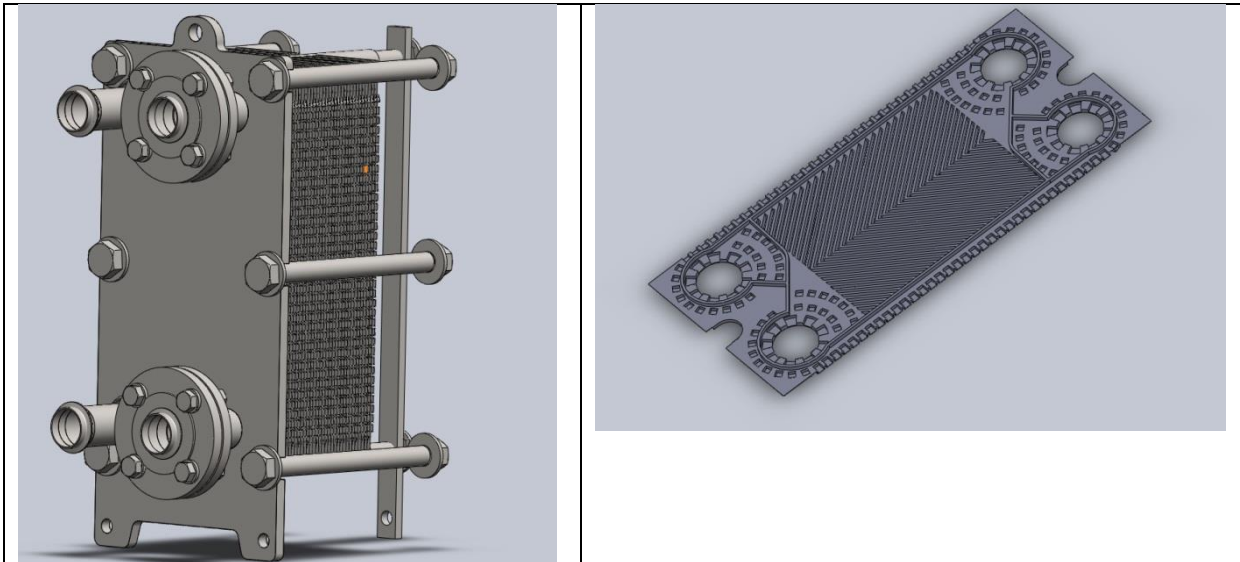


Abbildung 24: Links: CAD-Wärmetauschermodell für NoScale beim Zusammenbau; Rechts: NoScale CAD-Modell "Tiefgezogenes Wärmetauscherblech"

Dazu kommen Anfangsbedingungen und Festlegungen, die für die Simulation von Bedeutung sind: Ist die Strömung laminar oder schon turbulent? Wirkt die Schwerkraft auf die Strömung oder wirkt die natürliche Konvektion? Es erfordert daher viel Erfahrung im Bereich Strömungsmechanik und Thermodynamik, um die richtigen Anfangs- und Randbedingungen für die Simulation zu wählen. Im vorliegenden Fall liegt eine turbulente Strömung im Spalt zwischen den Wärmetauscherplatten vor. Wäre die Strömung laminar, dann würde sich die Wärme nur durch Leitung wie in den Strömungsgrenzschichten ausbreiten, was den Wirkungsgrad eines Wärmetauschers wesentlich reduzieren würde.

Der für die Strömungssimulation interessante Bereich liegt zwischen den Platten des Wärmetauschers. Für das Projekt NoScale wurde daher ein vollkommenes CAD-Modell eines Plattenwärmetauschers entwickelt. Die Platten wurden als Blechteile definiert und durch eine Tiefziehfunktion geprägt. Danach wurde eine Dichtung zwischen den Platten eingebracht, der Wärmetauscher konnte zu einer gesamten CAD-Baugruppe zusammengebaut werden. Um nun den interessanten Strömungsraum zu erhalten, bedient man sich des "Ausgusses" des Wärmetauschers. Dabei wird das CAD-Modell so mit einem Volumenkörper geschnitten, sodass sich der Innenraum des Plattenwärmetauschers ergibt, also quasi der Flüssigkeitsinhalt.

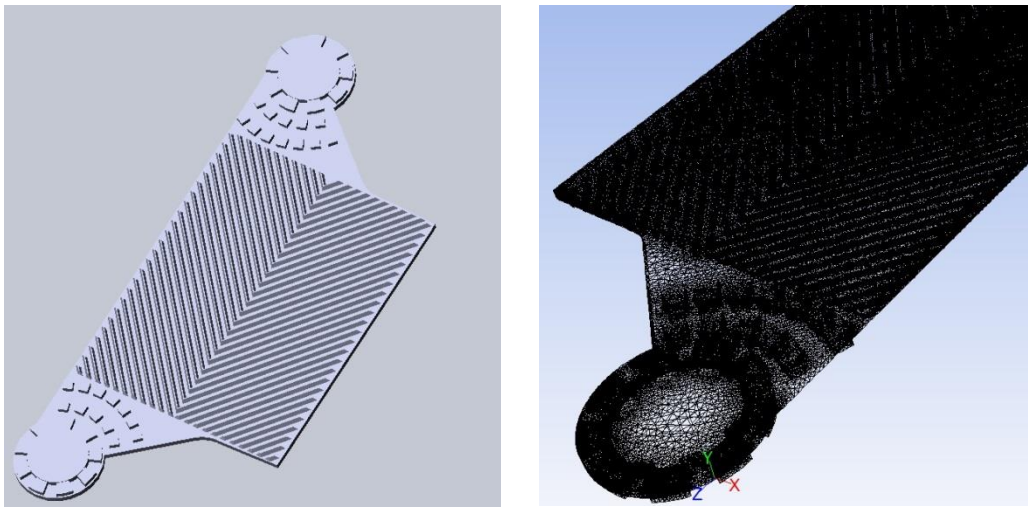


Abbildung 25: Links: Resultierender Flüssigkeitsraum im CAD-Modell zwischen zwei Wärmetauscherplatten. Rechts: Wärmetauscherplatte mit Netz (Mesh) aus finiten Elementen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Zwischenraum simuliert, um die vorhandene Rechenleistung auf die Problemstellung bündeln zu können. Alle weiteren Zwischenräume verhalten sich exakt gleich, da sie hydraulisch "parallel geschaltet" sind. Im nächsten Schritt wurde der Flüssigkeitsraum mit einem Netz aus finiten Elementen überzogen (Hexaeder, dann polyedrisiert; siehe Abbildung 25, rechts). Der Flüssigkeitsraum wurde mit insgesamt 1,4 Mio. Zellen aufgelöst. Es wurde die Impuls- und die Wärmeleichung simultan gelöst. Als Wärmeübertragungsflächen wurden die Flächen der angrenzenden Platten ausgewählt. Der Dichtungsbereich und die Zu- und Abströmbereiche sind nicht wärmeleitend, daher adiabat. Dabei tritt keine Wärmeleitung (Diffusion) auf, die konvektive Übertragung von Wärme herrscht vor. Das Brauchwasser auf der kalten Seite des Wärmetauschers strömt mit 20 °C zu. Der Massenstrom auf der heißen Seite wird mit 0,4 kg/s festgelegt (zusätzliche Fallstudie 0.8 kg/s). Nach Aussage des Herstellers hat die Schwerkraft im Auslegungsbetriebsbereich keinen wesentlichen Einfluss auf die Strömung. Es treten keine freien Oberflächen auf, die Froude-Zahl ist hoch ($Fr = \text{Trägheitskraft}/\text{Schwerkraft}$). Allerdings existieren bei zu niedriger Kapazität auch Zustände mit freien Flüssigkeitsoberflächen, bei denen die Schwerkraft nicht vernachlässigbar ist.

Die Platten der Wärmetauscher zeigen aufgrund ihrer Profilierung eine gute Verteilung der Strömung im Flüssigkeitsraum. Die Umlenkung an der Profilierung wirkt sich auch vorteilhaft auf die Wärmeübertragung aus. Somit stellen die Wärmetauscher aus der Sicht der Strömungsmechanik optimierte Systeme dar. Trotzdem zeigen sich zwei Zonen beruhigter Strömung; in diesen Bereichen können sich vermehrt erste Scales und/oder Foulingschichten ablagern. Bedeutend ist dabei die Totzone in der Ecke des Flüssigkeitsraums (Abbildung 26 links: dunkelblaue Ecke). An dieser Stelle ist von einer erhöhten Ablagerungstendenz auszugehen, da strömungsberuhigte Zonen Ablagerungen und Korrosionen begünstigen. Würde man die Ausführung eines Wärmetauschers

optimieren, so könnte man daher vorteilhaft die Totzone minimieren bzw. vermeiden und die Struktur entlang der gezeigten Strömung führen. Die dabei verlorene Austauschfläche könnte man durch die Anpassung der Bauhöhe wieder einbringen. Allerdings findet Scaling und Fouling bei Plattenwärmetauschern auf der gesamten Plattenoberfläche statt.

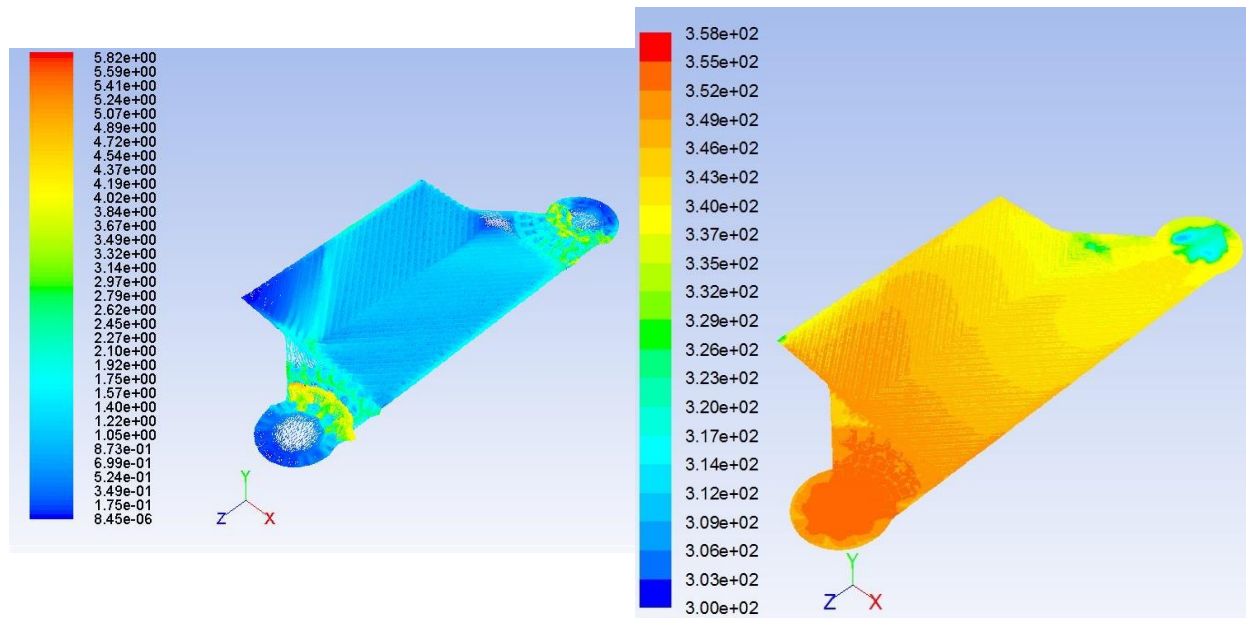


Abbildung 26: Links: Geschwindigkeitsvektoren: Ergebnis der Strömungssimulation des Wärmetauscherinhalts, Studie 0.4 [kg/s] Einsatz, Raster neben [m/s], Rechts: Temperaturprofile (Lösung der Wärmebilanz, Raster neben [°C])

Hinsichtlich Wärmeübertragung stellt der Plattenwärmetauscher einen optimierten Apparat dar; die Strömungssimulation zeigt im Fluidkörper keine Regionen mit Temperaturgradienten, die auf eine geringere Wärmeübertragung hinweisen würden (Totzonen, Hotspots, kältere Stellen). Plattenwärmetauscher erreichen laut Theorie Wärmeübertragungskoeffizienten von bis zu 8000 [W/m² K]. In Unterlagen der Firma Tranter werden Werte von 4500 [W/m² K] eingesetzt.

Wesentliche Parameter der Simulation sind:

Parameter	Größe [Einheit]
Einsatz Heiß	0.4 [kg/s]
Temperatur heiß, Einlass	353 [K]
Temperatur kalt, Einlass	300 [K]
Strömungsgeschwindigkeit Fluidkörper, maximal	im 5.8 [m/s]
Druckverlust Fluidraum	72.7 [kPa]
Schubspannung (Wand) min.-max.	0 - 228 [Pa]

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 5.8 [m/s] wird am Eintritt in das Flüssigkeitsvolumen bei der Umlenkung der Strömung um 90° erreicht (im oberen Bereich bei Einsatz von Stahl). Niedriger Durchsatz bedeutet geringeren Druckverlust und weniger Betriebskosten, führt jedoch zu Scaling- und Foulingeffekten. Dennoch liegt der bedeutende Systemparameter, die Schubspannung an der Wand mit 0 bis 228 [Pa] fast im gesamten Bereich der Wand unter den notwendigen 50 [Pa]. Obwohl nun der Durchsatz und Druckverlust hoch angesetzt wurden, ist aufgrund des Setups mit Scalingeffekten zu rechnen. Daher kann vermutet werden, dass das flächige Auftreten von Belag auch eine Folge der Umlenkung der Strömung durch die Blechprägung ist. Die Turbulenz an den Strukturen erhöht den Wärmeaustausch, verwirbelt aber auch die gerichtete Bewegungsenergie der Strömung, was zu einer Reduzierung der Schubspannungen gegenüber nicht geprägten Platten führen dürfte. Auch durch die Umlenkung der Strömung um 90° am Eintritt und die Erweiterung des Querschnitts wird Energie der Strömung abgeleitet.

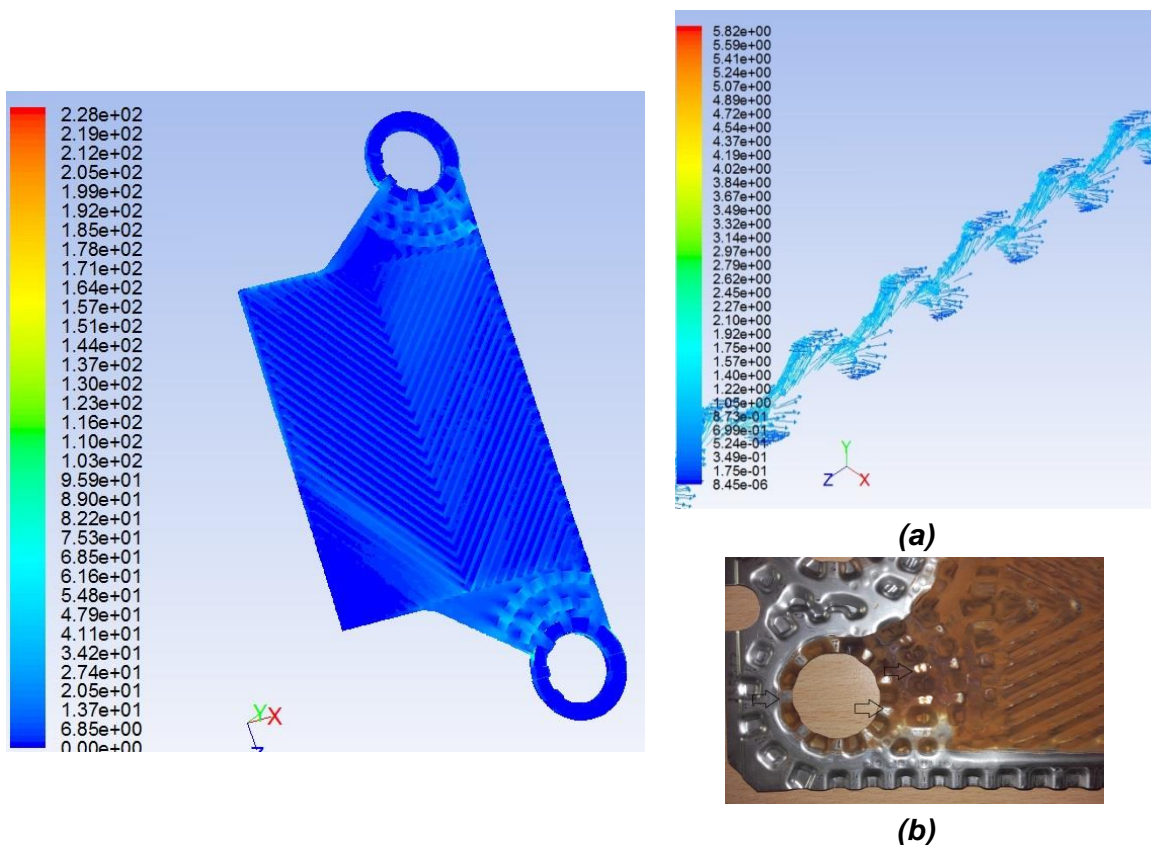


Abbildung 27: Links: Schubspannung an den Platten/Wand (Raster in [Pa]). Rechts oben (a): Geschwindigkeitsvektoren der Strömung im Zwischenraum der Platten, starke Umlenkung. Rechts unten (b): Druckpunkte vom direkten Aufeinanderliegen von Platten.

Als Ergebnis der Strömungssimulation ohne praktische Validierung kann festgehalten werden, dass es das Ziel einer Optimierung sein muss, **schwach durchströmte Zonen zu vermeiden und die Reduktion der Geschwindigkeitsenergie zu vermeiden**. Schwach durchströmte Zonen werden in schmalen und hohen Wärmetauschern weniger vorkommen.

Der Verlust der Geschwindigkeit kann reduziert werden, indem im Einlaufbereich freie Querschnitte geschaffen werden. Das Anliegen von benachbarten Platten an der Prägung bei zu hoher Pressung führt zu Druckverlusten, die wiederum die Geschwindigkeit und Schubspannung an den Oberflächen reduziert.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt NoScale konnten folgende Prozesse identifiziert werden, die hauptverantwortlich für Ausfällungen in den beprobten Hydrogeothermalanlagen sind:

- Abkühlung
- Entgasung von CO₂
- Mischung von Wässern unterschiedlicher hydrochemischer Zusammensetzung (Versinterungen)
- Sauerstoffzutritt
- Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten (Querschnitte)
- Turbulenzen

Diese Vorgänge führen zu **signifikanten Verschiebungen von chemischen Gleichgewichten** in der Lösung. Wegen der unterschiedlichen geologischen und hydraulischen Randbedingungen in den einzelnen geothermischen Aufschließungsgebieten muss auf die **individuelle Problematik jeder Anlage**, die sich aufgrund der örtlichen geochemischen Bedingungen und der bei der Förderung vorherrschenden Temperatur- und der Druckverhältnisse ergeben, gesondert eingegangen werden.

Des Weiteren konnten folgende zusammenfassenden Aussagen aus den Ergebnissen des Projekts abgeleitet werden:

- Die **Entgasung** ist bei der Ausfällungsproblematik wichtiger als Abkühlungsprozesse.
- Das Auftreten von **Ausfällungen ist wesentlich an hohe Temperaturen** gekoppelt. Weitere entscheidende Faktoren sind der Wasserchemismus und der CO₂-Gehalt des Thermalwassers bzw. die Ausgasung von CO₂ beim Aufstieg in der Bohrung.
- Im **Modell** berechnete **Mengen von Ausfällungen** sind mitunter signifikant (einige Zehnerpotenzen) **geringer als in der Praxis**.
- **Kurzzeitige Übersättigungen** führen aufgrund der kinetischen Barriere **nicht spontan zu Ausfällungen**. Allerdings sollten Betriebsbedingungen so gehalten werden, dass eher Untersättigung vorliegt.

5 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt wurden in Hinblick auf eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer bzw. zur Vermeidung kostenintensiver Sanierungsmaßnahmen von Geothermieranlagen Empfehlungen für die Praxis erarbeitet. Die Vorschläge orientieren sich an den für die gegenständliche Fragestellung vorrangigen zwei Abschnitten eines Geothermieprojektes – der Planungsphase und der Betriebsphase.

I. Planungsphase

Ein wesentlicher Aspekt ist die **zeitliche Koppelung der Planung von Untertage- und Obertageeinrichtungen** der Geothermieanlage. Üblicherweise wird erst nach Durchführung der ersten wasserwirtschaftlichen Tests entsprechend den qualitativen und quantitativen Ergebnissen das Konzept für die Obertage-Einrichtungen adaptiert bzw. entworfen. Es hat sich jedoch bewährt, die obertägigen Anlagenteile (Leitungen, Wärmetauscher ...) bereits in die Bohrplanung einzubeziehen.

Hierbei ist vor allem die **Prognose der zu erwartenden Fluide und Gase** maßgeblich. Zu beachten ist, dass auch in geologischen Zonen, in denen die Thermalwässer eine relativ einheitliche Mineralisierung aufweisen, es hinsichtlich der Gefahr von Ausfällungen zu großen Unterschieden kommen kann; so zum Beispiel in den Malm-Wässern der Süddeutschen und Oberösterreichischen Molassezone. Dies ist auf Unterschiede in den Druckverhältnissen, Transmissivitäten, Temperaturen sowie der Gasführung zurückzuführen.

Die vorrangigen Planungsschwerpunkte in Zusammenhang mit den prognostizierten Eigenschaften des Thermalwassers werden wie folgt zusammengefasst:

- In Hinblick auf den erwarteten Wassertyp sollte die Verwendung von entsprechenden (ggfs. hochwertigen, korrosionsbeständigen) Materialien berücksichtigt werden, um den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage über mehrere Dekaden zu sichern.
- Bei der Auslegung der Tiefbohrung ist für die Minimierung von Ausfällungen und Korrosionen v.a. auf eine ausreichende Dimensionierung der Verrohrung zur Geringhaltung von Rohrreibungsverlusten zu achten, welche einen Anstieg der Pumpenströme bei der Förderung verursachen. Verrohrungen im Aquiferbereich werden - wenn nicht statische Erfordernisse wie z.B. nachbrechendes Gebirge dagegen sprechen - generell vermieden, um zusätzliche Rohrreibungsverluste hintanzuhalten.
- Großen Einfluss auf die Planung hat auch die zu erwartende Transmissivität des Aquifers, welche die notwendige Absenkung im Bohrloch steuert; d.h. die

Potenzialdifferenz, die angewendet werden muss, um einen festgesetzten Volumenstrom zu fördern. Daraus resultiert die Abhängigkeit der Pumpe (elektrische Tauchkreiselpumpe), für die ein ausreichender Bohrlochdurchmesser dimensioniert werden muss. Die Tiefenlage des Aquifers bestimmt die Länge der Verrohrungen.

- Die Einplanung eines Bypass-Strangs für Probenahme und Monitoring hat sich in der Praxis bewährt und ist gerade bei erwarteten kritischen Fluiden und Gasen zu beachten.
- Bei hohem CO₂-Gasanteil im Förderstrom kann der mit der Druckentlastung einhergehenden Entgasung (und den damit verbundenen massiven Ausfällungen von Karbonaten) durch eine entsprechend große Einbautiefe der Pumpe entgegengewirkt werden.
- Eine kombinierte Untertage-/Obertage-Modellsimulation ermöglicht die Abklärung und Lokalisierung potenzieller Ausfällungen und Korrosionen.
- Die mit Hilfe der Modellsimulation prognostizierte Entstehung von Ausfällungen in Verbindung mit der Abschätzung von Größe und Zusammensetzung der Partikel kann die optimale Dimensionierung der Filtersysteme in der Planungsphase wesentlich unterstützen.
- In Abhängigkeit von der prognostizierten Gasführung und dem damit verbundenen Entgasungsdruck des Thermalwassers, kann der optimale Betriebsdruck der Geothermieanlage veranschlagt werden.
- Bei erwarteten Ausfällungen ist die Einplanung eines Dosierstranges für die Zugabe von Inhibitoren in die Bohrung erforderlich.

Die im letzten Punkt angeführten Inhibitoren werden u.a. im Steirischen Becken eingesetzt, wo sie zur Hemmung von Karbonatausfällungen (infolge hoher CO₂-Gehalte) zum Einsatz kommen. Hierbei ist nach Eichinger & Eichinger (2012) besonders bei einer geplanten Mehrfachnutzung des Thermalwassers auf die Wahl geeigneter Inhibitoren zu achten. Diese müssen sowohl bei hohen Thermalwassertemperaturen (bei Wärme- und Stromgewinnung: >100 °C) stabil sein, als auch für die balneologische Anwendung trinkbar und vollständig biologisch abbaubar sein.

II. Betriebsphase

Ein wichtiger Schwerpunkt für die Betriebsphase von Geothermieanlagen sollte beim Monitoring gesetzt werden. Das **hydrochemische Monitoring der geförderten Fluide und Gase** sowie die **Beobachtung der Druckverhältnisse** sind in Hinblick auf die Vermeidung von Ausfällungen und Korrosionen bzw. in weiterer Folge für die Effizienz und Lebensdauer der Anlage wesentlich.

Im laufenden Betrieb der Hydrogeothermianlagen werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Regelmäßige Durchführung und Auswertung von hydro- und isotochemischen Untersuchungen sowie Gasanalytik der Thermalwässer.
- In-situ-Messungen von pH-Wert, Redox-Potenzial, elektrische Leitfähigkeit usw. Diese Parameter werden in der Praxis häufig erst im Labor ermittelt, da für den In-situ-Einsatz unter den extremen Druck- und Temperaturbedingungen und häufig korrosiven Verhältnissen einer Geothermianlage spezielle elektrochemische Messsensoren erforderlich sind.
- Überwachung und Konstanthaltung der Fließdrücke zur Vermeidung von Entgasung.
- Aufzeichnung und Auswertung der Betriebsdaten.

Mit den Monitoring-Maßnahmen können Veränderungen in der Wasserzusammensetzung des Thermalwassers sofort festgestellt und zeitnah darauf reagiert werden.

Häufig kommt es erst durch den Betrieb der Geothermianlage und dem damit verbundenen Wechsel der Verhältnisse im Bohrloch bzw. bohrlochnahen Bereich (u.a. Druck, Temperatur etc.) zu Veränderungen der Wasserzusammensetzung. So wurde in einigen Geothermianlagen im Laufe des Betriebs ein Anstieg der Schwefelwasserstoffgehalte beobachtet, die eine korrosive Wirkung auf die ober- und untertägigen Rohrleitungen ausüben können (Eichinger & Eichinger, 2012).

Grundsätzlich sollte der Anlagenbetrieb so erfolgen, dass untersättigte Bedingungen vorliegen (Vermeiden von Übersättigungen). Weiters ist ein stoßweiser Förderbetrieb (häufiges Ab- und An-Schalten der Pumpe) zu vermeiden, da es hierbei zur Mobilisierung von Ablagerungen kommen kann.

Für die **Behörden** können folgende Empfehlungen ausgesprochen werden:

- In Österreich und Bayern ist die behördlich vorgeschriebene Gasanalytik verpflichtender Bestandteil des Monitoringprogrammes. Der Parameterumfang wurde im Juli 2012 von der Expertengruppe "Thermalwasser" im Auftrag der Ständigen Gewässerkommission nach dem Regensburger Vertrag festgelegt (Büttner & Kolmer, 2012). Bis dato sind die Analysenergebnisse quasi ohne Konsequenzen. Die Analytik der gelösten und in freier Phase vorliegenden Gase ist ein wichtiger Bestandteil zur Beurteilung von Ausfällungen. Es fehlen bislang entsprechende Auswertungen, die Konsequenzen auf die Art des Betriebes einer Tiefbohrung aufzeigen (z.B. Änderung der Kopfdrücke).
- Durch die vorgeschriebenen Beweissicherungen bestehender Anlagen liegt der Behörde ein großer Datenpool vor. Diese Daten könnten als Grundlage für regionale

geochemische Modelle mit spezifischen Fragestellungen auch in Hinblick auf Ausfällungen und Korrosion herangezogen werden.

6 Literaturverzeichnis

- Büttner, W. & Kolmer, C. (2012): Grundsatzpapiere zur Thermalwassernutzung im niederbayerisch-oberösterreichischem Molassebecken.- Expertengruppe "Thermalwasser" im Auftrag der Ständigen Gewässerkommission nach dem Regensburger Vertrag, 94.
- Eichinger, F. & Eichinger, L. (2012): Angewandte Konzepte zur Sicherstellung der nachhaltigen Nutzung von Geothermieanlagen.: Workshop: Betriebsbegleitendes Fluidmonitoring in geothermischen Anlagen, GFZ Potsdam.
- Fritz, B., Jacquot, E. & Jacquemont, B. (2010): Geochemical modelling of fluid-rock interactions in the context of the Soultz-sous-Forêts geothermal system. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 653-667.
- Pape, H., Clauser, C., Iffland, J, Krug, R. & Wagner, R. (2005): Anhydrite cementation and compaction in geothermal reservoirs: Interaction of pore-space structure with flow, transport, P-T conditions, and chemical reactions. *Int. J. Rock Mech & Min Sci* 42, 1056 – 1069.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J. (1999): User's guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report.
- Piper, A.M. (1960): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans. Am. Geophys. Union* 25, 914 – 928.
- Rinder, T., Dietzel, M. & Leis, A. (2013): Calcium carbonate scaling under alkaline conditions – Case studies and hydrochemical modelling, *Applied Geochemistry* 35, 132-141.
- Stober, I. & Bucher, K. (2012): *Geothermie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Yoo, S-Y. Mito, Y., Ueda, A. & Matsuoka, T. (2013): A geochemical clogging model with carbonate precipitation rates under hydrothermal conditions. *Applied Geochemistry* 30, 67 – 74.

7 Kontaktdaten

Projektleitung:

DI Dr. Edith Haslinger
DI Otmar Plank
Dr. Stefan Wyhlidal
Daniel Elster MMSc.
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Energy Department
Konrad-Lorenz-Straße 24
3430 Tulln
Tel.: +43 50550-3608
Fax: +43 50550-3452
edith.haslinger@ait.ac.at
www.ait.ac.at

Projektpartner 1:

Univ.Prof. Dr. Johann Goldbrunner
Mag. Andrea Shirbaz
Mag. Marlies Gold
Mag. Martin Eisner
Geoteam, Technisches Büro für Hydrogeologie
Geothermie und Umwelt Ges.m.b.H
Bahnhofgürtel 77
8020 Graz
Tel.: +43 (0)316-269-269
Fax: +43 (0)316-269-269-15
goldbrunner@geoteam.at
www.geoteam.at

Projektpartner 2:

Univ.Prof. Dr. Martin Dietzel
Dr. Ronny Boch
Dr. Dorothee Hippler
TU Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften
Rechbauerstraße 12
8010 Graz

Projektpartner 3:

Dr. Albrecht Leis
Dr. Ralf Knauss

Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit
Leonhardstraße 59
8010 Graz

Subvertragsnehmer:

Mag. Dr. Heinz Fröschl
Seibersdorf Labor GmbH,
Geschäftsfeld Chemical Analytics,
2444 Seibersdorf