Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Karlsruhe Institute of Technology

MobiLit

Modularer und mobiler Lithium-Prüfstand

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)** **Institut für Angewandte Geowissenschaften** **Professur für Geochemie & Lagerstättenkunde**
Bearbeiter/Innen Karlsruhe:	**Kevin Altinger** **PD Dr. Elisabeth Eiche** **Prof. Dr. Jochen Kolb**

Förderkennzeichen:	**03G0930A**
Vorhabenbezeichung:	**MobiLit**
Laufzeit des Vorhabens:	**01.05.-31.12.2024, kostenneutral verlängert bis 31.03.2025**

I Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Der weltweite Bedarf an Lithium als strategischem Rohstoff für Batterien in der Elektromobilität und der stationären Energiespeicherung erfordert neue, nachhaltige Gewinnungskonzepte jenseits konventioneller Bergbaumethoden. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist die geothermisch gekoppelte Gewinnung von Lithium aus heißen Tiefenwässern, wie sie z.B. im Oberrheingraben in Deutschland zirkulieren. Diese Ressource ist aufbereitungstechnisch insofern herausfordernd, da es keine gängigen bzw. etablierten Technologien zur selektiven und umweltverträglichen Extraktion von Metallen aus Geothermalwasser im industriellen Maßstab gibt.

Die Aufgabenstellung des Vorhabens war daher, einen professionellen Prüfstand für einen Einsatz im Labor oder im industriellen Pilotmaßstab zu bauen, der automatisierte Sorptions- und Desorptionsexperimente, automatische Probenahme und kontinuierliches Monitoring erlaubt. Der Prüfstand sollte so konzipiert werden, dass er sowohl unter kontrollierten Bedingungen im Labor einer Universität oder eines Unternehmens als auch an einer industriellen Anlage z.B. über einen Bypass betrieben werden kann. Einzelne Bestandteile sollten modular austauschbar sein, um unterschiedliche Materialien oder Parameter im direkten Einsatz testen zu können. Darüber hinaus wurde der Prüfstand so konzipiert, dass er ohne großen Aufwand zwischen Laboren und Industrieanlagen transportierbar ist. Der Prüfstand sollte also möglichst universell anwendbar sein und somit die größtmögliche Flexibilität erlauben. Über den Einsatz in der selektiven Lithiumextraktion hinaus sollte der Prüfstand ebenfalls flexibel zur umweltverträglichen Erschließung anderer strategischer geologischer Ressourcen einsetzbar sein, die in Fluiden vorliegen. Der Prüfstand soll in zukünftigen Projekten dazu genutzt werden, wichtige Erkenntnisse zur stofflichen Nutzung von Geothermalwasser unter möglichst realistischen Bedingungen zu liefern. Erste Projektanträge waren in diesem Zusammenhang schon erfolgreich (z.B. LiquidMining; 03EI5035A).

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben „MobiLit“ konnte unter günstigen wissenschaftlichen, technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen starten. Eine entscheidende Voraussetzung für die Durchführung war die institutseigene Werkstatt mit entsprechender Projekterfahrung und großer Flexibilität, die für eine kurzfristige Umsetzung ausschlaggebend war. Für das Projekt bot sich mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) und u.a. mit dem Labor für Umwelt- und Rohstoffanalytik (LURA) ein etabliertes Forschungsumfeld, das über umfassende Erfahrung in der Charakterisierung geothermischer Systeme, der Wasserchemie (v.a. von salinaren Fluiden), der Entwicklung und Bewertung von Adsorptionsverfahren sowie der Planung und Konstruktion von Pilotanlagen zur selektiven Metallextraktion verfügt. Innerhalb des AGW war das Projekt in der Professur für Geochemie und Lagerstättenkunde

(EGG) angesiedelt, so dass ebenso fundiertes Wissen zur Evaluierung von Rohstoffprojekten bzw. zu rohstoffpolitischen Aspekten vorhanden ist. Bereits vor Projektbeginn lagen methodische und infrastrukturelle Grundlagen für die geplante Konstruktion der Pilotanlage vor, die in anderen Projekten (z.B. 03EE4023D UnLimited) erarbeitet wurden. Die Erfahrung der AGW-Werkstatt in materialtechnischer und mechanischer Hinsicht sowie die analytische und experimentelle Expertise des LURA ermöglichten die zügige Bauplanung und Auswahl geeigneter Messsonden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die durchgängige technische und wissenschaftliche Betreuung durch erfahrenes Personal. Die personellen Kapazitäten am EGG, im LURA sowie in der AGW-Werkstatt waren zum Projektbeginn vorhanden, sodass eine reibungslose Einbindung in die verschiedenen Arbeitspakete erfolgen konnte. Insbesondere die enge Abstimmung zwischen Werkstatt und Labor zur Planung und Umsetzung der Pilotanlage sowie zur Entwicklung des Monitoringsystems über Sonden profitierte von kurzen Kommunikationswegen und gemeinsamer technischer Vorarbeit.

Somit waren die wissenschaftlichen, technischen, infrastrukturellen und personellen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Bearbeitung der Arbeitspakete im MobiLit-Projekt bereits zum Projektstart in hohem Maße erfüllt. Diese Ausgangslage ermöglichte eine schnelle Operationalisierung der Arbeitspakete, reduzierte Reibungsverluste in der Projektabwicklung und trug wesentlich zum zielgerichteten Fortschritt des Gesamtvorhabens bei.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das MobiLit-Vorhaben wurde im Vorlauf bereits ausführlich geplant (AP 1), da der Zeitplan sehr ambitioniert war. Dabei haben die Expertenteams des AGW die Pilotanlage konzipiert, Bestelllisten erstellt, Angebote eingeholt und nach geeigneten Materialien und Sonden recherchiert, so dass zum Projektstart am 01.05.2024 das Projekt bereits grundlegend geplant war. Dies ist in Eigenleistung erfolgt, da das Projekt MobiLit nur mit Sachmitteln ausgestattet war.

Darauf folgten die Beschaffung der Geräte und Einzelteile (AP 2). Dies zögerte sich teilweise sehr lange hinaus, da die zweite Hälfte des Jahres 2024 durch starke Lieferengpässe gekennzeichnet war und das KIT das interne Bestellsystem sowie die Software dazu im Projektzeitraum umgestellt hatte. Letzteres führte zu starken, von uns unverschuldeten Verzögerungen in der Administration und Bestellung. Letztlich konnten jedoch alle notwendigen Teile, Sonden und Geräte erfolgreich beschafft werden. Die Beschaffung des Materials für die Pilotanlage erfolgte durch die Mitarbeiter der AGW-Werkstatt und die Beschaffung der Sonden und des Rasterelektronenmikroskopes (REM) durch Mitarbeiter von AGW-LURA.

Kontinuierlich wurden Teile des modularen und mobilen Lithium-Prüfstands in Abhängigkeit von der Beschaffungslage zusammengefügt bzw. in der AGW-Werkstatt hergestellt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Verzögerungen kam es hierbei auch zur verspäteten Fertigstellung einzelner Teile und der gesamten Anlage. Diese ist inzwischen grundlegend einsatzfähig und muss nur noch in Details nachgebessert werden. Alle notwendigen Teile sind vorhanden. Neben der Planung und der Bestellung von Sonden und Rasterelektronenmikroskope durch

im Wesentlichen drei Wissenschaftler, erfolgte die Detailplanung und der Bau durch den Werkstattleiter, einen Mitarbeiter und einen Lehrling.

Da der modulare und mobile Lithium-Prüfstand entgegen der ursprünglichen Planung im Antrag aufgrund von Lieferengpässen möglicher Anbieter direkt in der AGW-Werkstatt gebaut wurde, waren die Wege sehr kurz und die Kommunikation schon während der Planung und Konstruktion sehr eng. Durch den ständigen Austausch war eine Übergabe in dem Sinne nicht erforderlich und einzelne Teile der Anlage wurden bereits getestet (AP 4). Für das Rasterelektronenmikroskop fand eine Übergabe und die Schulung von Mitarbeitern erfolgreich statt. Diese Einheit kann von der Pilotanlage separat genutzt werden und findet schon Regen Einsatz in unterschiedlichen Forschungsprojekten am AGW.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bei MobiLit handelte es sich um ein Projekt, das ausschließlich über Sachmittel verfügte und das zum Ziel hatte, einen modularen und mobilen Lithium-Prüfstand zu konstruieren. Dieses Projekt war kein Forschungsprojekt im eigentlichen Sinne. Daher wurde nicht an einen tiefen wissenschaftlichen Stand angeknüpft. Es ging vor allem darum, eine Anlage zu konzipieren und zu konstruieren, um mit hoher Flexibilität im Pilotmaßstab Metalle (Fokus auf Lithium) aus einer wässrigen Lösung über Sorption selektiv extrahieren und diese dann für den Rohstoffmarkt zur Verfügung stellen zu können.

In Lösung liegen Metalle hauptsächlich als Kationen vor und haben unterschiedliche, aber definierte dehydrierte und hydrierte Ionenradii. Geothermalwässer sind häufig reich an unterschiedlichen Metallen, unter anderem Lithium (z.B. Jungmann et al. 2025). Die direkte Lithiumextraktion (DLE) aus Geothermalwasser kann über unterschiedliche Technologien erfolgen, wovon die Sorption bzw. der Ionenaustausch die vielversprechendste Methode ist (Reich et al. 2022). Jedoch müssen die Sorbenzien und benötigten Prozesschemikalien in der Regel an die unterschiedlichen Zusammensetzungen und physikochemischen Parameter der Geothermalwässer angepasst werden (Reich et al. 2022). Diese müssen vor Ort getestet und ggf. Überwacht werden. Die in diesem Projekt konstruierte Pilotanlage ist dazu geeignet und in der Lage, die wichtigsten Parameter vor Ort zu überwachen (Reich et al. 2023, 2024, Slunitschek et al., 2025):

1. Druck-, pH-, RedOx- und Temperaturstabilität
2. Physikalische Stabilität des Sorbens bzw. seiner Einbringungsform (z.B. Pellets) bei Fließgeschwindigkeit von bis zu 90 L/s
3. Hohe Lithiumselektivität, da Lithium (20 - 1750 mg/L) von den anderen gelösten Bestandteilen (TDS ~100 - 330 g/L) getrennt werden soll
4. Hohe Lithiumrückgewinnungsrate
5. Chemische Stabilität des Sorbens in unterschiedlichen Geothermalwässern
6. Stabilität der Kristallstruktur des Sorbens sowie Oberflächengeometrie und evtl. Präzipitate auf der Oberfläche
7. Reinheit des Produktes

8. Prozessoptimierung als Batch- oder Durchflussreaktionskammer und der Reaktionszeit sowie der Sorptions-/Desorptionszyklen
9. Potential für Korrosion und Scaling

In unterschiedlichen Projekten (EuGeLi, European Geothermal Lithium Brine; UnLimited) wurden zuvor Pilotanlagen entwickelt und getestet (Fries et al. 2022; Kölbel et al. 2024). Die Lithiumextraktion bei EuGeLi erfolgte in einem Karussell, das aus drei Säulen von je 8,3 L besteht, die mit dem Sorbens gefüllt sind. Zwei Säulen werden permanent in Reihe mit Geothermalwasser beladen, während in der dritten Säule desorbiert wird. Die Lithiumextraktion bei UnLimited erfolgte in einem 6-Liter-Reaktor mit 150 mm Nenndurchmesser und zwei getrennten Kreisläufen für Geothermalwasser und Desorptionslösung (Abb. 1). Um Korrosion zu vermeiden, wurden in UnLimited hoch edle, nichtrostende Stähle wie Hastelloy C276, 1.4571 oder 1.4401 und Oberflächenbeschichtungen gewählt. Für Dichtungen wurden temperatur- und korrosionsbeständige Materialien wie PTFE oder Graphit verwendet. Nach der Demontage wurden weder Scales noch Korrosion an den Bauteilen beobachtet. Zirkulation sorgt für eine konstante Strömungsdynamik und Durchmischung, wodurch auch die Ausfällung von Kesselstein verhindert wurden.

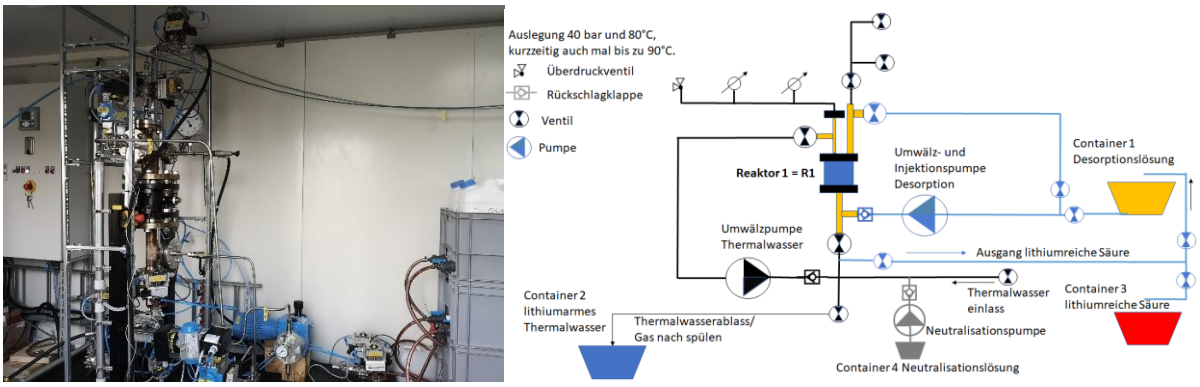

Abb. 1: UnLimited-Pilotanlage und Fließschema zur Lithiumextraktion aus Geothermalwasser in Bruchsal, wie in AGW-Werkstatt geplant und konstruiert.

Sorptions- und Desorptionskreislauf waren jeweils an eine Zentrifugalpumpe mit 28 m³/h Durchfluss angeschlossen (Abb. 1). Das Sorptionsmittel wurde im Reaktor durch zwei Siebe mit einer Maschenweite von 250 µm gehalten. Die Flüssigkeit wurde zur Gewährleistung einer optimalen Durchmischung immer von unten in den Reaktor eingeführt. Das Geothermalwasser wurde über einen Bypass des Geothermiekraftwerks mit 18 ± 2 bar eingespeist. Neutralisations- oder Pufferlösungen konnten über eine Membranpumpe hinzugefügt werden (Abb. 1). Für das kontinuierliche Monitoring hatten wir eine pH-Sonde des Typs Rosemount™ 3300 HT (pH-Wert, T), einen Drucksensor und ein Manometer im System installiert. Die pH-Sonde war jedoch nach kurzem Einsatz defekt. Pneumatisch betriebene Kugelventile steuerten den Fluss in der Anlage elektronisch, was zu starken Druckschwankungen geführt hat. Die Automatisierung aller Ventile, Pumpen und Sensoren wurde in einem Steuerschrank installiert und elektrisch verdrahtet (Abb. 1). Ein Blindversuch legten eine Kreuzkontamination von Sorptions- und Desorptionslösung offen. Diese resultierte aus der Anhaftung von Flüssigkeit an Oberflächen oder dem Verbleib in Toträumen. Diese positiven und negativen

Erfahrungen aus den vorangegangenen Projekten dienten als Basis für die Planung und Konstruktion der MobiLit-Anlage. Da die Materialauswahl zuvor schon passend war, haben ähnliche wir Materialien verwendet, wie im UnLimited-Projekt. Es wurden jedoch andere Sonden bestellt, die robuster sind, bzw. bei Bedarf einfach aus der Anlage entfernt und ausgetauscht werden können. Die Programmierung/Automatisierung wurde flexibler vorgenommen, andere Ventile verwendet sowie der Totraum minimiert, um eine signifikante Querkontamination zu vermeiden.

Für die Auswahl des geeigneten REM haben wir unter Anderem unterschiedliche Sorbensproben aus dem UnLimited-Projekt bei verschiedenen Herstellern getestet und Bildgebung, Handhabung und Analytik geprüft. Daraufhin wurde das Instrument mit dem besten Preis-Leistungsverhältnis gewählt (HITACHI FlexSEM1000II).

5. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Keine. Die einzelnen Komponenten der Pilotanlage waren käuflich erhältliche Teile, die in einer innovativen Form zusammengeführt wurden. Als Grundlage diente die Pilotanlage aus dem Projekt 03EE4023D UnLimited (Kapitel 4), auf deren Basis die Planung und Weiterentwicklung erfolgte.

6. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Da es sich beim vorliegenden Projekt nicht um ein wissenschaftliches Projekt im eigentlichen Sinne handelt wurde nicht auf Fachliteratur zugegriffen. Die Recherche zur Identifizierung geeigneter Sonden und Rasterelektronenmikroskope erfolgte online, über Kataloge oder Telefongespräche. Drei Rasterelektronenmikroskope wurden vor Ort bei den Firmen getestet.

Materialien für die Pilotanlage wurden über AD-Merkblätter und Werkstoffdatenblätter für 1.4571 und 1.4462 ausgewählt. Es wurde sich mit Metallbauern abgestimmt, um einen metallischen Werkstoff zu finden, der dem spezifischen Milieu standhält: salinare, hochkorrosive Medien, 80°C und 40 bar. Nach Auswahl geeigneter Materialien wurden die mechanischen Bauteile ausgelegt. Dafür haben wir die druckführenden Bauteile, die nicht zukaufbar waren, berechnet und ausgelegt. Als Grundlage wurden die AD-2000 Merkblätter sowie die materialspezifischen Stoffdatenblätter genutzt. Die Berechnungen haben wir mit MS Excel durchgeführt. Die anschließende mechanische Konstruktion erfolgte mit einem CAD-Programm (Autodesk Inventor). Für die CNC-Fertigung kam ein CAM-Programm (Autodesk Fusion) zum Einsatz. Die elektrische Konstruktion haben wir mit der Software Eplan electric P8 durchgeführt.

7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Keine.

II Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

AP 1: Vorbereitung und Planung

Das AGW hat mit vier erfahrenen Wissenschaftlern das Projekt im Detail geplant (Planung Rasterelektronenmikroskop siehe AP 2). Wir konnten keine externe Firma identifizieren, die die Arbeiten im Projektzeitraum hätte durchführen können und haben daher beschlossen, den Prüfstand komplett in der AGW-Werkstatt zu planen und zu konstruieren. Dazu wurde der Werkstattmeister Kevin Altinger in die Planungen einbezogen. Die Planung der Anlage war zum 01.05.2024 abgeschlossen und es wurde zum Projektstart mit der Bestellung begonnen.

Für die Materialauswahl mussten die chemischen und physikochemischen (Druck, Temperatur, pH-Wert, Salinität) Charakteristika der zu fördernden Medien eingegrenzt und definiert werden. Die Materialien wurden für bis zu 80°C und 40 bar, sowie einen pH-Bereich zwischen 4 und 8 ausgelegt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Materialien nicht leicht oxidieren. Es musste ein spezifischer Edelstahl (Duplex 1.4462) verwendet werden.

Für die Auswahl der Sonden wurde definiert, welche Prozessparameter inline erfasst werden sollen und an welcher Stelle der Anlage ein solches Monitoring als sinnvoll erachtet wurde. Wir haben uns für 4 Sensorblöcke entschieden, die mit folgenden Sonden bestückt sind:

- Manometer
- Durchflussmesser
- Temperatur

Die folgenden Sonden sind teils zu groß für den Sensorblock oder es konnten keine Sonden für den notwendigen Temperatur- oder Druckbereich auf dem Markt identifiziert werden:

- pH-Elektrode
- Elektrode zur Leitfähigkeitsbestimmung
- Elektrode zur Bestimmung unterschiedlicher Ionen (Multi ion probe: Ca^{2+}, Cl^-, K^+, Na^+, NH_4^+, NO_3^-, Mg^{2+})
- Lithiumelektrode

Daher wurden diese teils im Reaktor und teils direkt am Probenauslass installiert, um sie je nach den Charakteristika des durchströmenden Mediums leicht aus der Anlage herausnehmen zu können.

Ein wichtiger Aspekt war die Frage, an welcher Stelle es Sinn mache, bestimmte Versuchsparameter verändern zu können, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse über ein breites Experimentalspektrum gewinnen und möglichst flexibel arbeiten zu können. Hierzu wurden Ventile und Pumpen an unterschiedlichen Stellen der Anlage vorgesehen. Die mechanischen Pläne wurden erstellt und geprüft.

In der Anlage sind Druckbehälter verbaut, die aus der Eigenfertigung stammen. Aufgrund der Verwendung hochkorrosionsbeständiger Stähle ist die Anfertigung der Druckbehälter sehr zeitintensiv. Eine detaillierte Abstimmung mit dem war TÜV notwendig, um den sicheren

Betrieb zu dokumentieren. Unsere Berechnung wurden überprüft und vom TÜV bestätigt. Eine Einzelabnahme war laut TÜV nicht notwendig.

Um die Anlage betreiben zu können, bedarf es einer geeigneten Steuerung. Da das primäre Ziel der MobiLit-Anlage die Datenerfassung ist und nicht die Prozessautomatisierung, haben wir uns dafür entschieden, die Anlage via LabVIEW zu steuern und die Prozessparameter zu erfassen. Hierzu wurden entsprechend Pläne für die elektrischen Konstruktionen erstellt und geprüft.

AP 2: Beschaffung und Installation REM

Die Rahmenbedingungen für das REM für den modularen und mobilen Prüfstand waren, ein Gerät zu identifizieren, dass sehr gute Ergebnisse in der Bildgebung und eine hohe Auflösung hat, einfach zu bedienen und gleichzeitig transportabel ist. Nach einer anfänglichen Recherche durch Frau PD Dr. Elisabeth Eiche haben wir folgende Geräte näher in Betracht gezogen:

- Hitachi FlexSEM1000II scanning electron microscope (SEM), vertrieben durch die Quantum Design GmbH
- SEC SNE-Alpha SEM, vertrieben durch die Algona GmbH
- Thermo Fisher, mit dem Phenom XL G2 SEM, vertrieben durch die Schaefer Technologie GmbH

Das eigentliche Auswahlverfahren wurde von Dr. Simon Hector durchgeführt. Anhand einer Auswahl repräsentativer Proben wurden die analytischen Fähigkeiten jedes REM im Hinblick auf unsere Anforderungen bewertet.

- Hämatitkristalle, Hydroxidpulver und Siliziumdioxidpulver wurden verwendet, um die Bildgebungsfähigkeiten der Geräte zu bewerten, insbesondere ohne leitfähige Bedampfung. Die feinen Strukturen dieser Proben mit variabler Leitfähigkeit eignen sich besonders gut für diesen Test. Dies kommt der praktischen Anwendung mit unterschiedlichen Sorbenzien (z.B. Lithiumeisenphosphat, Zeolith, Al-Hydroxide) sehr nahe.
- Gesteinsdünnschliffe und polierte Blöcke von massiven Sulfiden wurden verwendet, um die Bildgebungs- und EDX-Analysefähigkeiten der Geräte zu testen. Die chemische Analyse ist wichtig, um die Sorption von konkurrierenden Metallen, die am Sorbens anhaften, sowie die Stabilität der Sorbenzien analysieren zu können. Lithium selbst kann physikalisch mittels EDX nicht direkt bestimmt werden.
- In Epoxidharz eingegossener Zirkon und Apatit wurde verwendet, um die Kathodolumineszenz (CL)-Analysefähigkeiten des Hitachi FlexSEM1000II zu bewerten, dem einzigen Gerät, das mit einem CL-Detektor ausgestattet ist. Dies ist eine zusätzliche Möglichkeit der Bildgebung auch von bestimmten Sorbenzien.

Die Testläufe wurden persönlich durch Dr. Hector in Begleitung eines Technikers vor Ort bei den Firmen durchgeführt Ausnahme war die Firma Algona. Hier konnten die Proben nur im Labor in Evry (Frankreich) getestet werden. Daher wurden die Proben per Post geschickt und die Ergebnisse per Mail zur Verfügung gestellt. Diese Vergleichstests haben gezeigt, dass das Hitachi FlexSEM1000II das für das Projekt am besten geeignete Gerät ist. Es vereint hervorragende Bildgebungsfunktionen und Flexibilität (keine Beschichtung für die meisten

Proben erforderlich, CL), gute EDX-Analysefunktionen mit dem Oxford AztecOne EDX-Detektor und der zugehörigen Software (automatische Interferenzkorrektur und Phasenerkennung), einfache Wartung und begrenzte Servicekosten.

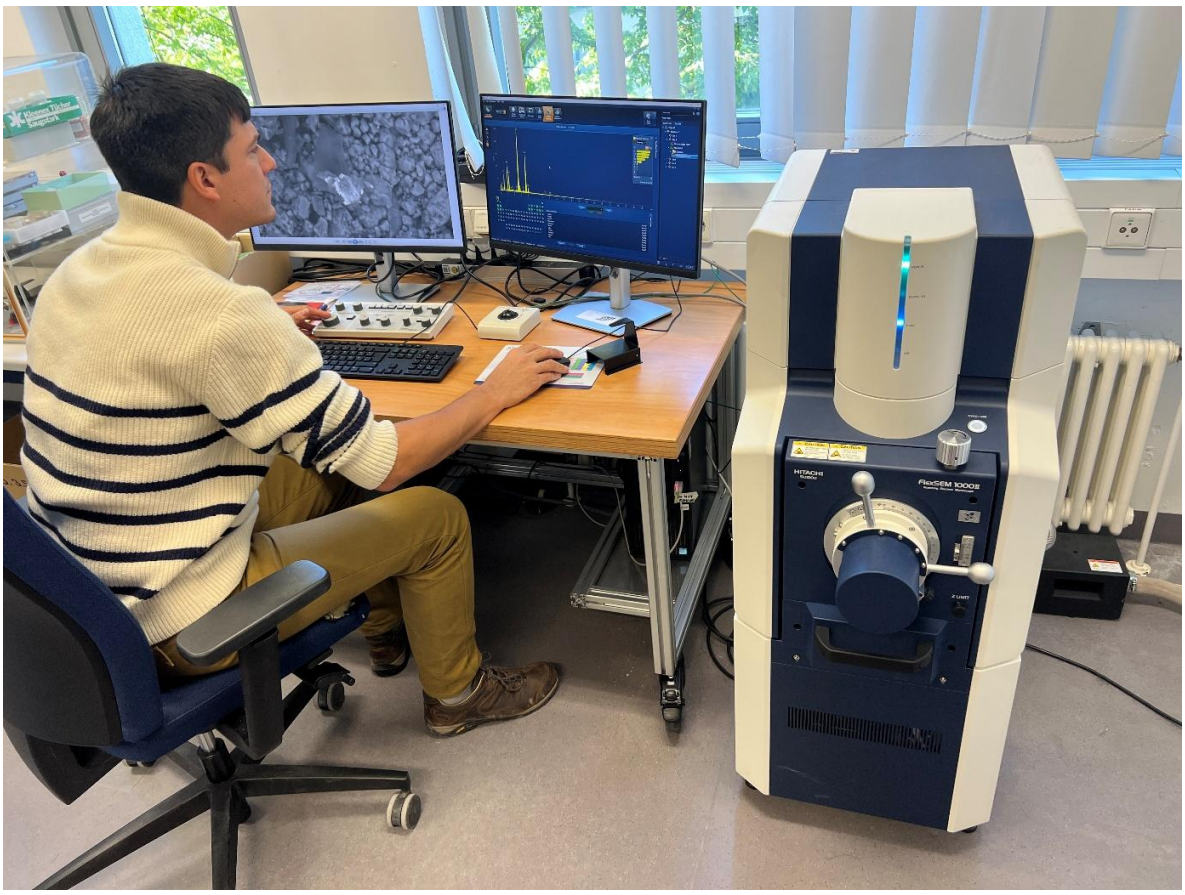

Abb. 2: Das REM wurde in einem Laborraum in LURA installiert und wird dort betrieben. Die Mobilität ist durch den Rolltisch gewährleistet. Das Instrument kann geteilt und auf sowie unter den Tisch gestellt werden.

Das REM wurde im Dezember 2024 geliefert. Die finale Installation und Kalibration im Labor für Umwelt- und Rohstoffanalytik erfolgten am 21.01.2025 durch ein Team der Quantum GmbH. Ein Team von Wissenschaftlern und Technikern des KIT-AGW nahm an der Geräteschulung für Bedienung und Wartung vom 22.-23.01.2025 teil, so dass das REM selbständig betrieben werden kann. Seitdem ist das Gerät in Betrieb und wird in ersten wissenschaftlichen Projekten unabhängig von der Pilotanlage genutzt (Abb. 2). Diese umfassen die Charakterisierung von Lithiumbatteriematerialien, Sorbenzien, Fossilien (Kooperation mit dem Naturkundemuseum Karlsruhe) sowie Gesteins- und Erzproben. Das REM wurde auch für Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Tages der offenen Tür am KIT eingesetzt. Das Gerät wurde bisher für 450 Stunden analytisch betrieben und darüber hinaus für die weitere Datenauswertung genutzt. Daten des REM wurden bereits in folgendem Artikel publiziert (Abb. 3): Hector, S., Ahmad, Q., Patten, C.G., Chiaradia, M., Nomikou, P., Kilias, S., Peillod, A., Wagner, S. & Kolb, J. (2025). Unravel subseafloor hydrothermal leaching and

magmatic degassing during chimney formation at Kolumbo volcano. Scientific Reports 15, 14673. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99586-5.

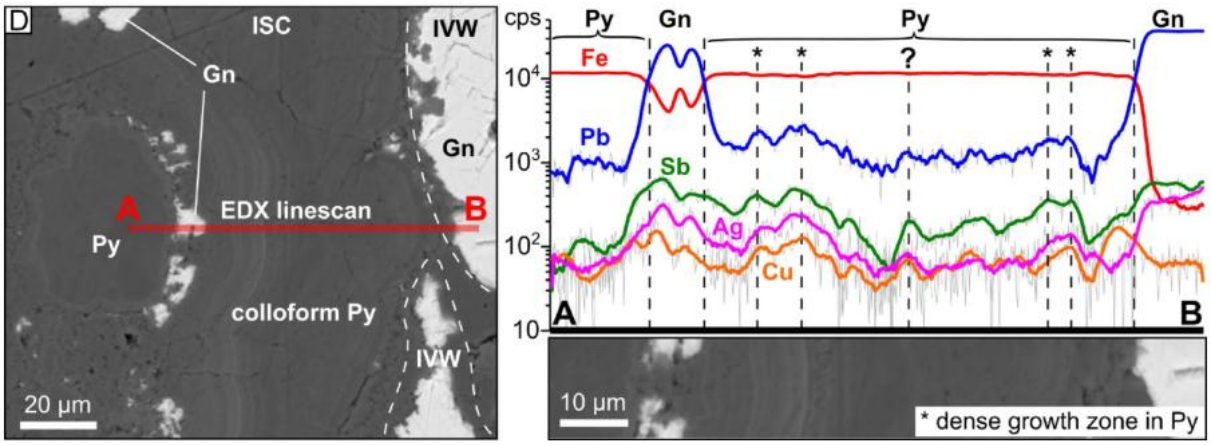

Abb. 3: Rückgestreutelektronenbild eines zonierten Black Smoker, das den Übergang von Pyrit zu kolloformem Pyrit mit Galenit-Wachstumszonen zu Galenit zeigt. Eine EDX-Linienmessung zeigt die chemische Zusammensetzung der Probe. Das Signal wird mit Hilfe der benachbarten Mittelwertmethode geglättet; das Rohsignal wird in Hellgrau dargestellt (Hector et al. 2025).

AP 3: Planung und Bau des modularen und mobilen Lithium-Prüfstands

Die Pläne aus AP 1 wurden konkretisiert und detailliert sowie eingehend geprüft. Auf der Basis dieser Pläne wurde mit der Bestellung begonnen. Es wurden Bauteile, Halbzeuge, Hilfsmittel, und Rohmaterialien bestellt. Den Bestellprozess haben Lieferengpässe und die Software- und Prozessumstellung am KIT erheblich erschwert und verzögert. Dies hatte auch negative Auswirkungen auf den Bau des Prüfstandes, da immer wieder wichtige Teile nicht lieferbar waren. Dadurch kam es zu signifikanten Verzögerungen und der Notwendigkeit, das Projekt um drei Monate zu verlängern. Auch die Taktung in die Abläufe der AGW-Werkstatt gestalteten sich dadurch schwierig.

Die in der AGW-Werkstatt hergestellten Bauteile wurden mittels konventioneller und CNC gestützter Maschinen gefertigt (Abb. 4). Diese wurden dann nach und nach mit den anderen Teilen gemäß den Plänen zu Baugruppen montiert. Anschließend wurde die Montagewand dimensioniert, vorbereitet und aufgebaut (Abb. 5). An diese wurden die Unterbaugruppen, Einzelteile und die zugekauften Teile in prozesstechnischer Abfolge montiert. Hierzu waren im Projektzeitraum drei Werkstattmitarbeiter beschäftigt.

AP 4: Übergabe und Test

Der modulare und mobile Prüfstand ist im Wesentlichen fertiggestellt. Das REM ist auf einen Rolltisch montiert und bereits in Nutzung (Abb. 2). Es funktioniert ohne Probleme und kann von AGW-Personal und Gastwissenschaftlern einfach bedient werden. Die Pilotanlage zur Lithiumextraktion wurde in Abschnitten getestet. Eine formale Übergabe mit Test ist insofern nicht nötig, da der Prüfstand in der eigenen Werkstatt konstruiert wurde. Da im Moment in keinem unserer Projekte eine solche Anlage verwendet wird, werden Teile der Anlage weiter optimiert. Es werden Anschlüsse für die laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

eingebaut, die es ermöglichen werden, Lithium in kurzen Abständen im Prozesswasser zu analysieren, eine innovative Technologie, die gerade von AGW und Fraunhofer in anderen Projekten entwickelt wird. In absehbarer Zeit wird der Prüfstand im gerade angelaufenen Projekt LiquidMining (03EI5035A) eingesetzt (vermutlich gegen Ende 2026). Unsere Werkstatt arbeitet mit Hochdruck an der Fertigstellung der Anlage für den mobilen Einsatz.

Abb. 4: Unterschiedliche Schritte bei der Herstellung der Druckreaktoren in der AGW-Werkstatt.

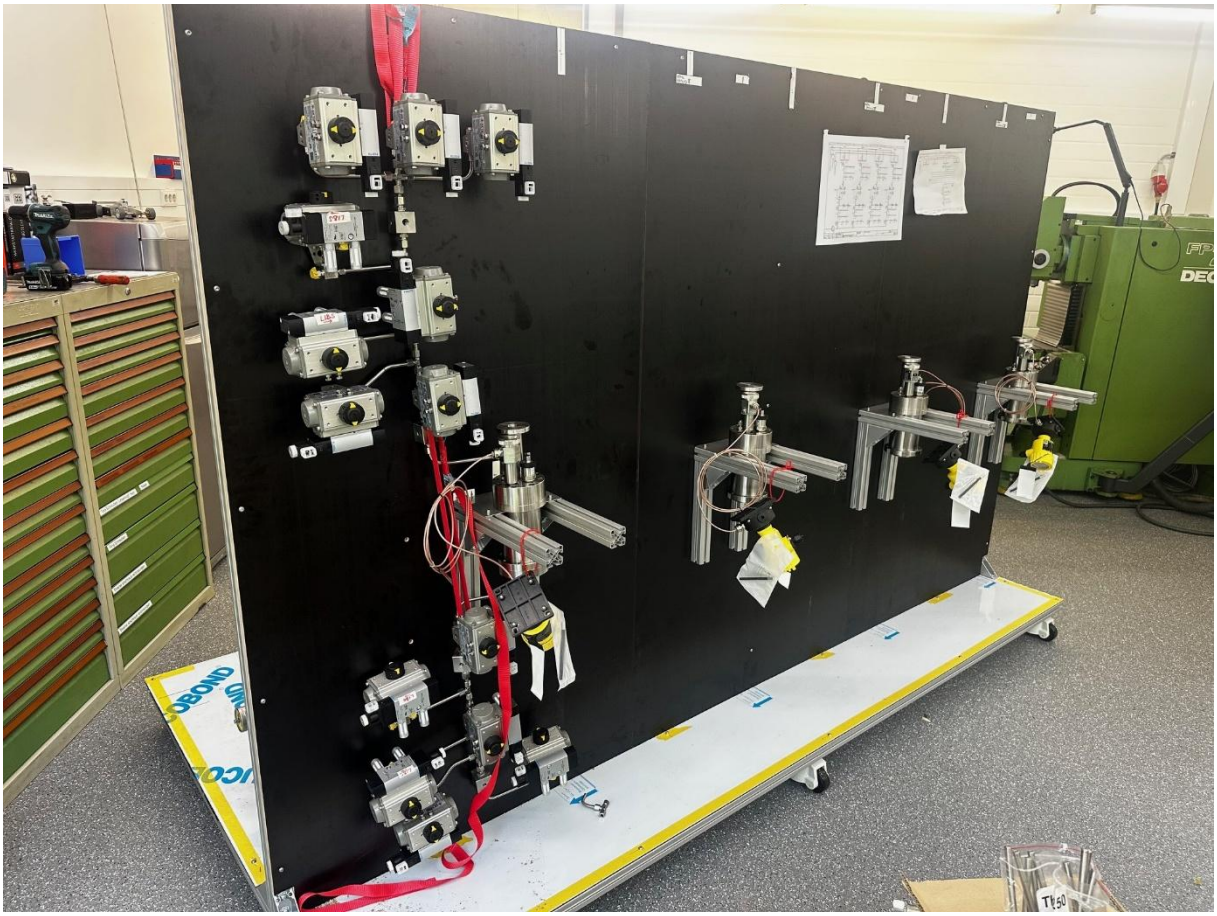

Abb. 5: Montagewand des Prüfstandes mit ersten montierten Teilen. Zu sehen sind die vier parallelen Systeme für die Reaktoren und erste Ventile. Der elektronische Schaltschrank befindet sich auf der Rückseite.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Umsetzung der Projektziele von MobiLit waren gezielte Investitionen in Ausrüstung und Infrastruktur erforderlich. Hierzu zählten insbesondere die Materialbeschaffung und Fertigung von Komponenten für die Pilotanlage. Darunter korrosions- und druckbeständige Reaktoren, Temperatur-, Druck- und pH-Sensorik, automatisierbare Pumpen, ein Kompressor zur Druckhaltung und Ventile sowie Steuerungseinheiten. Zusätzlich wurden Rohmaterialien und Halbzeuge sowie Werkzeuge und Hilfsmittel zur mechanischen Fertigung beschafft. Ebenso wurde ein Rasterelektronenmikroskop zur Charakterisierung der Sorbenzien wie LMO, LFP und Zeolithe angeschafft und installiert. Diese Investitionen waren notwendig, um den modularen und mobilen Lithium-Prüfstand den technischen und wissenschaftlichen sowie sicherheitsrelevanten Anforderungen entsprechend zu konstruieren und schnell auf Ergebnisse der Experimente reagieren zu können. Angaben zur weiteren Kostenaufstellung können bei Frau Despoina Pappa im Sekretariat des KIT-AGW-EGG erfragt werden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Projektes MobiLit konnten zentrale technische Projektziele in enger Zusammenarbeit im KIT-AGW erfolgreich umgesetzt werden. Die Planung, die Entwicklung und der Aufbau des modularen und mobilen Lithium-Prüfstandes stellten eine anspruchsvolle planerische und handwerkliche Herausforderung dar, die nur durch die enge Kooperation im Institut realisiert werden konnte. Die Konstruktion hochdruck- und korrosionsbeständiger Reaktoren, die Implementierung von automatisierten Prozessabläufen und hochsensiblen Sensoren, die Anpassung der Anlage an die realen Bedingungen geothermischer Reinjektionssysteme sowie die Verbesserung bestimmter Parameter gegenüber bestehenden Anlagen waren entscheidende Schritte. Es ist uns keine weitere mobile Anlage in dieser Art bekannt. Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal der MobiLit-Anlage und stellte zusätzliche Anforderungen an Planung und Umsetzung. Intensive Planung ermöglichte die Konstruktion einer kompakten Anlage, die in handelsüblichen Lieferwagen oder kleinen LKWs transportiert und im industriellen Umfeld eingesetzt werden kann. Die durchgeführten Arbeiten, einschließlich intensiver Planung und teils aufwändigen Materialbeschaffung waren zur Erreichung der Projektziele unerlässlich. Vor diesem Hintergrund sind Umfang, Tiefe und Qualität der im Projekt geleisteten Arbeiten als in vollem Maße notwendig und angemessen zu bewerten.

4. Voraussichtlicher Nutzen insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der im Projekt MobiLit konstruierte modulare und mobile Lithium-Prüfstand liefert eine tragfähige Grundlage für vor Ort Experimente zur direkten Lithiumextraktion (DLE) aus geothermischen Tiefenwässern oder anderen, ähnlichen Wässern. Im Zentrum des Projekts stand die Planung, Entwicklung und Errichtung einer Pilotanlage zur sorbensbasierten Lithiumgewinnung, die nach Bedarf variiert und vor Ort in industriellen Anlagen betrieben werden kann. Die Anlage wurde so konzipiert, dass der kontinuierliche Betrieb der Energiegewinnung nicht beeinträchtigt wird und gleichzeitig eine selektive Extraktion von Lithium aus der Thermalsole erfolgen kann. So können Tests direkt vor Ort wichtige Einblicke für die zukünftige wirtschaftliche Nutzung bzw. ggf. notwendige Optimierungen dieser Technologie liefern.

Angesichts der strategischen Bedeutung von Lithium für die Energiewende und den europäischen Batteriemarkt kommt der heimischen Produktion eine wachsende Bedeutung zu. Darüber hinaus werden Geothermalwässer, heiße Quellen und unterschiedliche Industrieabwässer als Rohstoffquelle entdeckt und im Zuge von Recycling und Urban Mining für die kombinierte Nutzung von Wärme und Rohstoffen sowie der zirkulären Rohstoffführung untersucht. Der im Projekt MobiLit konstruierte modulare und mobile Lithium-Prüfstand stellt eine kritische Infrastruktur an der Schnittstelle von Laborexperimenten und industrieller Nutzung dar und wurde so konzipiert, dass er möglichst vielseitig als Pilotanlage einsetzbar ist.

Kurzfristig wird die Pilotanlage im laufenden DiRecReg-Projekt eingesetzt werden. In diesem Projekt wird eine Recyclingtechnologie für Lithiumionenakkus entwickelt. Bei verschiedenen

Prozessschritten kann Lithium gelöst und im Industrieabwasser angereichert werden. Die MobiLit-Anlage soll genutzt werden, um die Lithiumextraktion mit unterschiedlichen Sorbenzien zu testen und zu entwickeln. Im Projekt LiquidMining, das gerade anläuft, soll die sorbensbasierte Rohstoffextraktion an unterschiedlichen natürlichen Quellen mit Lithium und anderen Metallanreicherungen getestet werden. Es sollen sowohl unterschiedliche Sorbenzien eingesetzt als auch unterschiedliche Metalle extrahiert werden. Die MobiLit-Anlage ist dafür ideal, da sie modular aufgebaut ist, so dass ein schneller Wechsel von Sorbenzien, Additiven und Desorptionslösungen möglich ist. Des Weiteren wurden unterschiedliche Sonden eingebaut, die ein flexibles und umfassendes Monitoring des Sorptions- und des Desorptionsprozesses ermöglichen. Das separate, mobile REM ermöglicht die detaillierte Charakterisierung der Sorbenzien vor Ort. Hoch aufgelöste Laboranalytik wird im Teststadium vor Ort nur noch in Ausnahmefällen nötig sein.

Auf lange Sicht kann MobiLit signifikanten, positiven wirtschaftlichen Einfluss auf die Lithiumextraktion aus Wässern haben. Entsprechende Projekte werden in Deutschland nicht mehr nur im Oberrheingraben, sondern auch in der Altmark vorangetrieben. Neben Geothermalwasser steht dabei auch die Nachnutzung von Erdöl- bzw. Erdgasbohrungen im Fokus. Da die Extraktionstechnologie immer auf den Standort angepasst werden muss, kann die MobiLit-Anlage einen essenziellen und kostengünstigen Beitrag leisten, da sie modular und mobil direkt am Standort einsetzbar ist. Darüber hinaus ist DLE nicht auf die Gewinnung von Lithium aus Geothermalwasser beschränkt, sondern kann ebenfalls in der Aufbereitung von Solen, wie sie z.B. in den Salaren Südamerikas oder bei der Erdölproduktion anfallen, angewendet werden.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Uns ist nicht bekannt, dass an anderer Stelle ein modularer und mobiler Lithium-Prüfstand parallel entwickelt wurde oder wird. Die EnBW hat an ihrem Standort in Bruchsal eine Pilotanlage gebaut, die auf die Lithiumextraktion in zwei Stufen in Batchreaktoren setzt. Diese Anlage ist fest und ausschließlich auf die Gegebenheiten in Bruchsal ausgerichtet. Die Pilotanlagen von Vulcan Energy in Insheim und Landau existierten bereits bei Projektstart, sind aber ebenfalls nicht mobil und darauf ausgerichtet, Parameter oder Sorbenzien zu variieren. Hier sind uns keine signifikanten Entwicklungen bekannt geworden.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Es handelt sich nicht um ein wissenschaftliches Projekt, von dem Teilaspekte veröffentlicht werden können. Bisher hat die Pilotanlage noch keinen Einsatz in einem wissenschaftlichen Projekt gehabt. Vom REM wurden erste Daten veröffentlicht.

6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Hector, S., Ahmad, Q., Patten, C.G., Chiaradia, M., Nomikou, P., Kilias, S., Peillod, A., Wagner, S. & Kolb, J. (2025). Unravel subseafloor hydrothermal leaching and magmatic degassing

during chimney formation at Kolumbo volcano. Scientific Reports 15, 14673. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99586-5.

6.2 Abschlussarbeiten

Keine.

6.3 Geplante Veröffentlichungen

Der Einsatz der Pilotanlage in zwei laufenden Projekten, DiRecReg/SynBat und LiquidMining, ist fest geplant, so dass in den Jahren 2026/2027 sicher mit Veröffentlichungen gerechnet werden kann. Das Rasterelektronenmikroskop ist von der Pilotanlage separat einsetzbar und wird rege genutzt. Hier werden in Kürze weitere Aufnahmen und Daten in wissenschaftlichen Veröffentlichungen erscheinen.

Referenzen

Fries, D., Lebouil, S., Maurer, V., Martin, C., Baujard, C., Ravier, G., Boguais, R., Amari, S. 2022. Lithium extraction through pilot scale tests under real geothermal conditions of the Upper Rhine Graben. European geothermal Congress, Berlin.

Jungmann, M., Walter, B. F., Eiche, E., Giebel, R. J., Kolb, J. 2025. The source of lithium in connate fluids: Evidence from the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France 2025. Journal of Geochemical Exploration 270, 107641.

Kölbel, L., Slunitschek, K., Kaymakci, K., Kölbel, T., Reich, R., Schneider, J. 2024. Lithium recovery from geothermal brines: an investigation into radioactive nuclide uptake on lithium-manganese-oxide (LMO) granules. Hydrometall. 224, 106266.

Reich, R., Slunitschek, K., Danisi, R.M., Eiche, E., Kolb, J. 2022. Lithium extraction techniques and the application potential of different sorbents for Lithium recovery from brines, Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 1–20.

Reich, R., Danisi, R.M., Kluge, T., Eiche, E., Kolb, J. 2023. Structural and compositional variation of zeolite 13X in lithium sorption experiments using synthetic solutions and geothermal brine, Microporous Mesoporous Mater. 359, 112623.

Reich, R. Eiche, E. Kolb, K. 2024. Delithiation and lithiation of LiFePO4: Implications for direct Li extraction from synthetic solutions and geothermal brines. Desalination 586, 117883.

Slunitschek, K., Eiche, E., Kolb, J. 2025. Sorption of lithium and competing ions from geothermal brine to lithium manganese oxide sorbent and implication for industrial use. Separation and Purification Technology 378, 134594.