

Exploration Concept and Implementation of a Salar with Lithium Brine in South America

Salars and salt lakes occur in South America and other arid areas of the World and contain large quantities of lithium brine. The concentration of brine varies across the salars. A good knowledge of the internal structure of the salars is needed to optimize the exploitation

and pumping plan. This information is also needed to ensure that brine production is done in an ecologically sustainable way. This article is based on a presentation of the first author at the International DMT MiningForum on 19th May 2022 in Berlin/Germany.

Explorationskonzept und Umsetzung eines Salars mit Lithiumsole in Südamerika

In Südamerika und anderen trockenen Gebieten der Welt gibt es Salare (Salzseen usw.), die große Mengen an Lithium-Sole enthalten. Die Konzentration der Sole variiert von Salar zu Salar. Eine gute Kenntnis der inneren Struktur der Salare ist erforderlich, um die Ausbeutung und den Pumpplan zu optimieren. Diese Informa-

tionen werden auch benötigt, um sicherzustellen, dass die Solenförderung auf ökologisch nachhaltige Weise erfolgt. Der Beitrag basiert auf einem Vortrag des erstgenannten Verfassers anlässlich des Internationalen DMT MiningForums am 19. Mai 2022 in Berlin.

Introduction

In South America a number of salars with a high quantity of lithium brine exist. Even if an amount of brine is visible on the surface, the brine concentration varies across these salars. In most cases a number of different depth levels of aquifers and aquitards can be determined. Furthermore the brine distribution and chemical composition across these salars can vary. Also the internal structures of the salars and their basement are very important to know to carry out an optimized exploitation/pumping plan. From knowledge of the structure of a salar and its surroundings, it is possible to infer the source of lithium and other mineral enrichment. In most cases, the production process from brines out a salar results not only in a final saleable product, but also in a greater variance, especially with sustainable mine planning. Several steps are necessary for the exploratory work to make the project successful.

Preconditions and first steps

Since most of the salars have been explored by oil and gas exploration companies in the past, a good database on the geological structure can be compiled by way of a literature desktop study. In most cases seismic exploration, gravimetric explorations from previous campaigns or general mapping of national geologic services are available either in national libraries or already digitized in the web. In some cases even information about samples are available (Figure 1).

Einleitung

In Südamerika gibt es eine Reihe von Salaren mit einer großen Menge an Lithium-Sole. Auch wenn vieles der Sole an der Oberfläche erkennbar ist, variiert die Solekonzentration innerhalb dieser Salare. In den meisten Fällen lassen sich verschiedene Tiefenstufen von Aquiferen und Aquitards feststellen. Auch die Verteilung und die chemische Zusammensetzung der Sole in diesen Salaren kann variieren. Die Kenntnis der inneren Strukturen der Salare und ihres Grundgebirges sind sehr wichtig, um einen optimierten Ausbeutungs-/Pumpplan zu erstellen. Aus der Kenntnis der Struktur eines Salars und seiner Umgebung kann auf die Quelle der Lithium- und anderer Mineralanreicherungen geschlossen werden. In den meisten Fällen führt der Produktionsprozess aus den Solen eines Salars nicht nur zu einem verkaufsfähigen Endprodukt, sondern auch zu einer größeren Varianz, insbesondere bei einer nachhaltigen Bergwerksplanung. Für die Erkundungsarbeiten sind mehrere Schritte erforderlich, um das Projekt zum Erfolg zu führen.

Voraussetzungen und erste Schritte

Da die meisten Salare in der Vergangenheit von Erdöl- und Erdgasexplorationsunternehmen erkundet wurden, kann eine gute Datenbasis über die geologische Struktur durch eine Literaturrecherche zusammengestellt werden. In vielen Fällen sind seismische Untersuchungen, gravimetrische Untersuchungen aus früheren Kampagnen oder allgemeine Kartierungen der nationalen geolo-

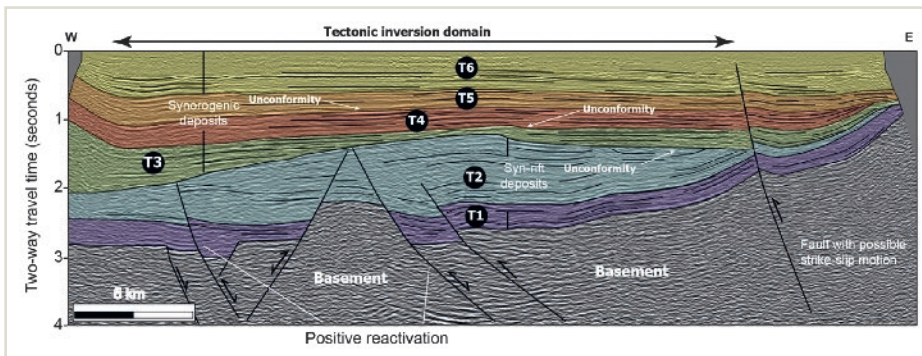


Fig. 1. Example for available geological information from historic oil and gas campaigns.
Bild 1. Beispiel für verfügbare geologische Informationen aus historischen Öl- und Gaskampagnen.
Source/Quelle: K-UTEC

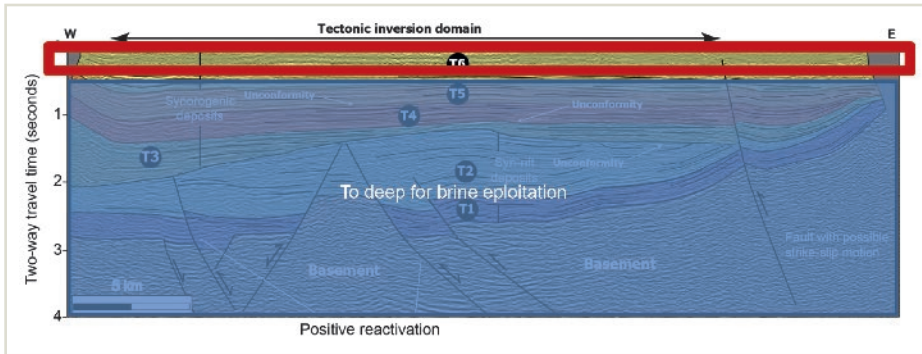


Fig. 2. Example for the limitation of the useable data from historic geoscientific models.
Bild 2. Beispiel für die Limitierung der nutzbaren Daten aus historischen geowissenschaftlichen Modellen.
Source/Quelle: K-UTEC

But these historic information have to be re-checked and put into the context of the new exploration phase. In most cases only a limited part of the historic information can be used for the actual exploration phase (Figure 2).

With this previous information a conceptual model can be established by dividing the concession area in geological main units, areas with different chemical and mineralogical background or even with different aquifer parameters.

On the base of these information a first exploration phase should be carried out with, e. g., augering on the surface and some new wells into the underground, based on the conceptual model. Additional information can be provided via satellite data (topographic models and false colour images) for preliminary exploration (Figure 3). Thus, it is possible to infer the mineral distribution at the surface on the basis of the colour images. If this is not available, a drone exploration program with LIDAR and photogrammetry can be carried out. The resulting geological base model forms the basis for the robust planning of the geological and geophysical exploration work.

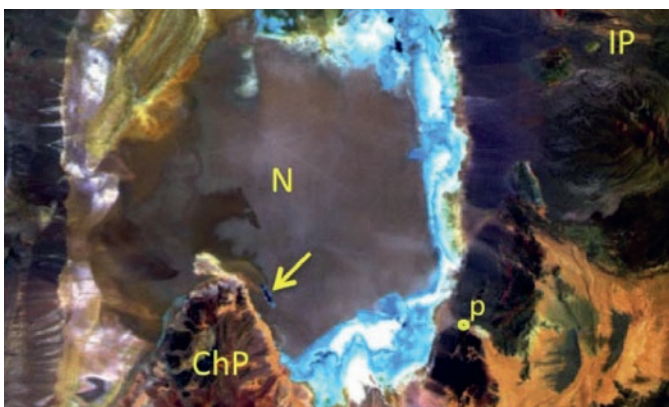


Fig. 3. Example for a false coloured image from satellite data.
Bild 3. Beispiel für ein Falschfarbenbild aus Satellitendaten.
Source/Quelle: K-UTEC

gischen Dienste entweder in nationalen Bibliotheken oder bereits digitalisiert im Internet verfügbar. In einigen Fällen sind sogar Informationen über Proben oder Bohrkerne verfügbar (Bild 1).

Diese historischen Informationen müssen jedoch erneut geprüft und in den Kontext der neuen Erkundungsphase gestellt werden. In den meisten Fällen kann nur ein begrenzter Teil der historischen Informationen für die aktuelle Explorationsphase verwendet werden (Bild 2).

Mit diesen Informationen kann ein konzeptionelles Modell erstellt werden, indem das Konzessionsgebiet in geologische Haupteinheiten, Gebiete mit unterschiedlichem chemischem und mineralogischem Hintergrund oder sogar mit unterschiedlichen Aquiferparametern unterteilt wird.

Auf der Grundlage dieser Informationen sollte eine erste Explorationsphase durchgeführt werden, z. B. mit Bohrungen an der Oberfläche und einigen neuen Bohrungen in den Untergrund, basierend auf dem konzeptionellen Modell. Zusätzliche Informationen können über Satellitendaten (topographische Modelle und Falschfarbenbilder) für die Vorerkundung bereitgestellt werden (Bild 3). So ist es möglich, anhand von Farbbildern auf die Mineralienverteilung an der Oberfläche zu schließen. Stehen diese nicht zur Verfügung, kann ein Drohnenexplorationsprogramm mit LIDAR und Photogrammetrie durchgeführt werden. Das daraus resultierende geologische Basismodell bildet die Grundlage für eine weitere Planung der geologischen und geophysikalischen Erkundungsarbeiten.

Das Ziel der geologischen und geophysikalischen Erkundungsarbeiten ist die Identifizierung von ressourcenreichen und -armen Gebieten. Letztere können dann in weiteren Schritten detaillierter erkundet werden.

Erkundungsphase

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Überprüfung der bisherigen Daten und der neuen Übersichtsdaten kann ein detailliertes Ex-

The objective of the geological and geophysical exploration efforts is the identification of resource-rich and -poor areas. The latter can then be explored more in detail in a subsequent step.

Exploration phase

Based on the results of the verification of previous data and the new overview data a detailed exploration program can be carried out. In case of salar exploration, the following exploration concept must include geological investigation and hydrogeological investigation in addition to geophysical exploration with the transient electromagnetic method (TEM) and seismic methods (Figure 4). The information of the drilling results (coring, sampling, downhole geophysics) will lead to a necessary geological block model followed by a hydrogeological flow model. These models are the base for the further pumping test plans. The aim of the geophysical measurement programme is to detect structural parameters – sedimentary layering within the salar – or structures which describe the basin evolution and the inflow areas of the brine levels in detail.

Furthermore, it is possible to distinguish electrical parameters (free mobile electrons and ions in brine) with geophysical methods like TEM. These parameters are directly connected to the amount of mineralization of the brine.

Method TEM

The TEM, alternately called time-domain EM (TDEM) or pulse EM (PEM), is a commonly-used, non-intrusive, geophysical method for obtaining subsurface resistivity-conductivity data (Figure 5). Because rock conductivity strongly correlates to rock properties, TEM is an effective way to map changes within rock or soil, e.g., clayey layers restricting groundwater flow, conductive leachate in groundwater and seepage in earthen embankments.

TEM have been used in mineral exploration for more than half a century and are now used for an extremely broad range of applications in exploration, engineering, and environmental investigation (Figure 6).

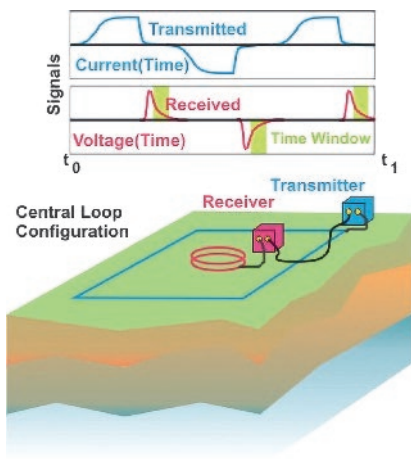


Fig. 5. Principle for TEM measurement in the field (1). // Bild 5. Prinzip der TEM-Messung im Feld (1).

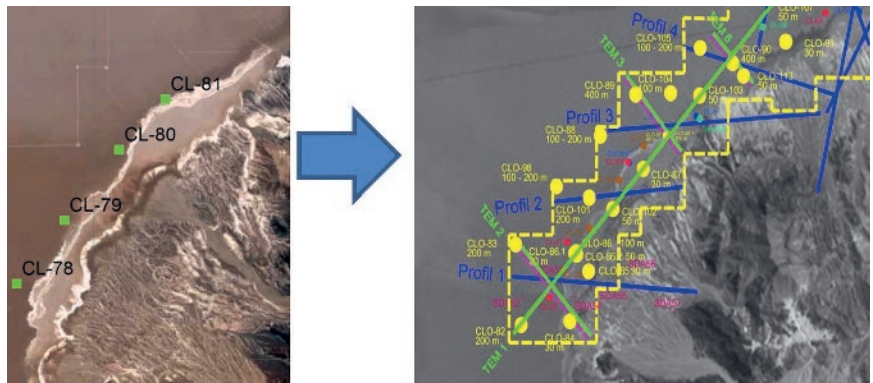


Fig. 4. Example for exploration well design with additional connecting geophysical exploration program. // Bild 4. Beispiel für ein Erkundungsbohrungsdesign mit zusätzlichem, verbindendem geophysikalischen Erkundungsprogramm. Source/Quelle: K-UTEK

plationsprogramm durchgeführt werden. Im Fall der Salarexploration muss das folgende Erkundungskonzept neben der geophysikalischen Erkundung mit der transienten elektromagnetischen Methode (TEM) und seismischen Methoden auch geologische und hydrogeologische Untersuchungen beinhalten (Bild 4). Die Informationen aus den Bohrergebnissen (Bohrkerne, Probenahmen, Bohrlochgeophysik) führen zu einem notwendigen geologischen Blockmodell, gefolgt von einem hydrogeologischen Strömungsmodell. Diese Modelle bilden die Grundlage für die weiteren Pumpversuchspläne. Ziel des geophysikalischen Messprogramms ist es, strukturelle Parameter (Sedimentschichtung innerhalb des Salars) oder Strukturen zu erfassen, welche die Beckenentwicklung und die Zuflussbereiche der Soleniveaus detailliert beschreiben.

Darüber hinaus ist es möglich, mit geophysikalischen Methoden wie TEM elektrische Parameter – frei bewegliche Elektronen und Ionen in der Sole – zu bestimmen. Diese Parameter stehen in direktem Zusammenhang mit dem Grad der Mineralisierung der Sole.

Methode TEM

Die TEM, auch Time-Domain-EM (TDEM) oder Puls-EM (PEM) genannt, ist eine häufig verwendete, nicht-invasive geophysikalische Methode zur Gewinnung von Daten über den spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeit des Untergrunds (Bild 5). Da die Leitfähigkeit des Gesteins stark mit den Gesteinseigenschaften korreliert, ist die TEM ein wirksames Mittel zur Kartierung von Veränderungen im Gestein oder im Boden, z. B. von tonhaltigen Schichten, die den Grundwasserfluss behindern, von leitfähigem Sickerwasser im Grundwasser und von Sickerwasser in Erddämmen.

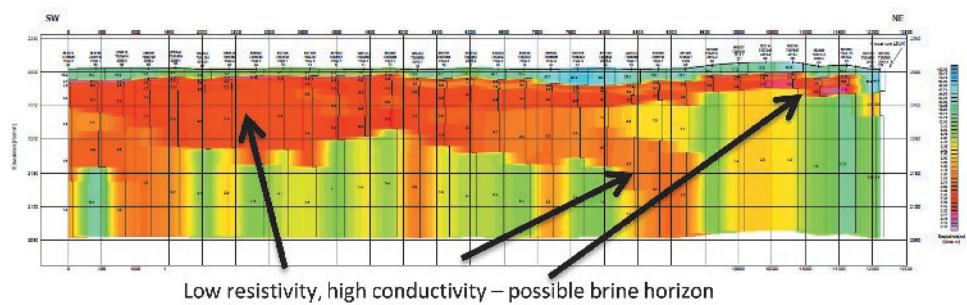


Fig. 6. TEM processing result and first interpretation of the figures. Bild 6. Ergebnis der TEM-Bearbeitung und erste Interpretation der Abbildungen. Source/Quelle: K-UTEK

Good results have been achieved in the past with active seismic exploration but also with passive seismic (H/V seismic) to identify internal structures (Figure 7).

TEM and Nano- or Zero TEM measurements are particularly suitable to obtain conductivity parameters in arid zones and conventional geoelectrical methods for areas with a “wet” surface.

This information can provide targeted indications for brine deposits. The identified areas can be verified by a drilling programme with core sampling, brine sampling as well as hydrogeological tests (punch tests, swallow test, etc.) (Figure 8). A borehole geophysical programme should be carried out to determine petrophysical and hydrogeological parameters (density, conductivity, water content, gamma radiation, porosity, permeability etc.).

All collected samples have to be analysed in a certified lab and rechecked in an independent second certified lab. The distribution and statistical calculations will lead to the next step of modelling.

Based on the resulting basic hydrogeological model, further exploratory wells can be selectively sunk and pumping tests (long-term pumping tests, performance pumping tests) can be conducted to determine the specific hydraulic properties of the identified brine aquifers. Iteratively, the hydrogeological model is improved with new parameters.

Feasibility phase

Based on the production parameters obtained, hydrogeologic model, the chemical results and the process parameters for conversion of the mineral composition into the product, the resources and reserves can be determined.

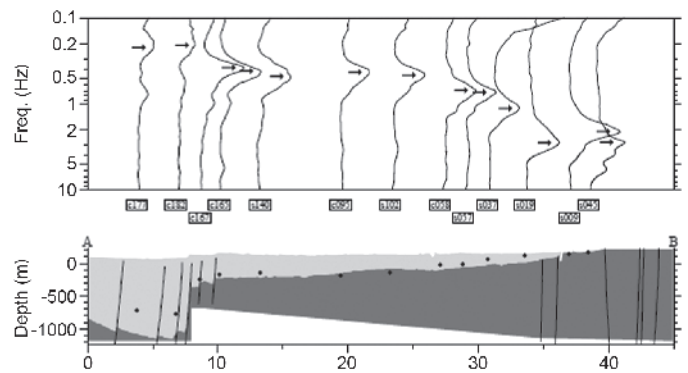


Fig. 7. From processing of the H/V seismic data to the geological model. Bild 7. Von der Verarbeitung der seismischen H/V-Daten zum geologischen Modell. Source/Quelle: K-UTEC

TEM-Methoden werden seit mehr als einem halben Jahrhundert in der Mineralexploration eingesetzt und werden heute für eine Vielzahl von Anwendungen in der Exploration, im Ingenieurwesen und bei Umweltuntersuchungen verwendet (Bild 6).

Gute Ergebnisse wurden in der Vergangenheit mit aktiver seismischer Erkundung, aber auch mit passiver Seismik (H/V-Seismik) zur Identifizierung interner Strukturen erzielt (Bild 7).

TEM- (und Nano- bzw. Zero-TEM-) Messungen eignen sich besonders gut zur Gewinnung von Leitfähigkeitsparametern in trockenen Gebieten und konventionelle geoelektrische Methoden für Gebiete mit „feuchter“ Oberfläche.

Diese Informationen können gezielt Hinweise auf Solevorkommen liefern. Die identifizierten Gebiete können durch ein Bohrprogramm mit Kernproben, Soleproben sowie hydrogeologischen Tests (Druck-Tests, Schluck-Test, etc.) verifiziert werden (Bild 8). Zur Bestimmung petrophysikalischer und hydrogeologischer Parameter (Dichte, Leitfähigkeit, Wassergehalt, Gammastrahlung, Porosität, Durchlässigkeit usw.) sollte ein geophysikalisches Bohrlochprogramm durchgeführt werden.

Alle entnommenen Proben müssen in einem zertifizierten Labor analysiert und in einem unabhängigen zweiten zertifizierten Labor erneut überprüft werden. Die Verteilung und die statistischen Berechnungen führen zum nächsten Schritt der Modellierung.

Auf der Grundlage des sich daraus ergebenden hydrogeologischen Grundmodells können selektiv weitere Erkundungsbohrungen abgeteuft und Pumpversuche (Langzeitpumpversuche, Leistungspumpversuche) durchgeführt werden, um die spezifischen hydraulischen Eigenschaften der identifizierten Sole-Aquifere zu bestimmen. Iterativ wird das hydrogeologische Modell mit neuen Parametern verbessert.

Machbarkeitsphase

Auf der Grundlage der ermittelten Produktionsparameter, des hydrogeologischen Modells, der chemischen Ergebnisse und der Prozessparameter für die Umwandlung der mineralischen Zusammensetzung in das Produkt können die Ressourcen und Reserven bestimmt werden.

Die Reservenabschätzung und die Planung der Aufbereitungsanlage führen zu einer CAPEX/OPEX-Schätzung. Schließlich werden die mineralische Zusammensetzung, die örtlichen Gegeben-

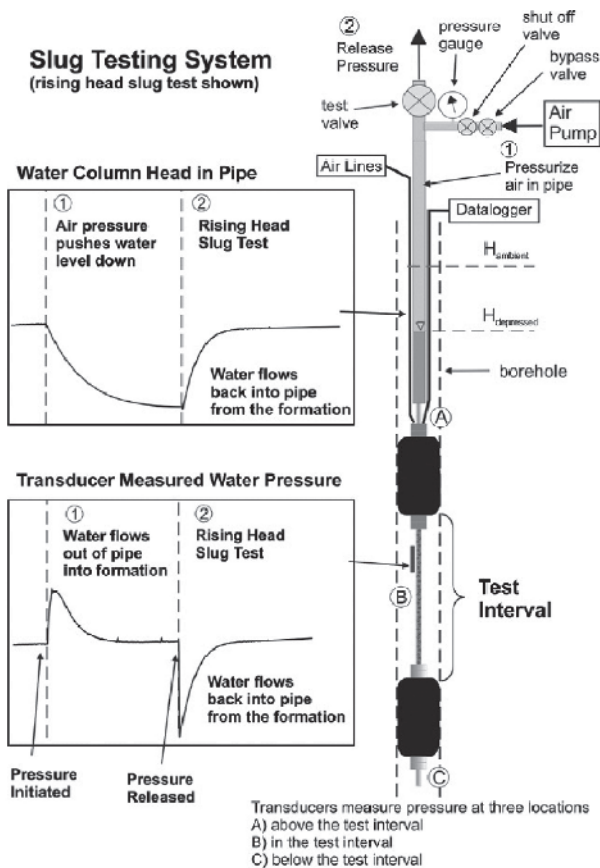


Fig. 8. Scheme for a hydraulic packer test in the field (2). Bild 8. Schema für einen hydraulischen Packertest im Feld (2).



Fig. 9. Example for a processing plant as a result of a good exploration phase with a resource and reserve estimation and a final CAPEX/OPEX plan.

*Bild 9. Beispiel für eine Aufbereitungsanlage als Ergebnis einer guten Erkundungsphase mit einer Ressourcen- und Reservenschätzung und einem endgültigen CAPEX/OPEX-Plan.
Photo/Foto: K-UTEC*

The reserve estimation and the processing plant design lead to a CAPEX/OPEX estimation. Finally, the mineral composition, the local circumstances like logistic, energy, trained manpower will be transferred into a business plan for the exploitation of the brine field. This information is also needed to ensure that brine production is done in an ecologically sustainable way. If these estimations together with a business plan have a positive economical response, than the exploration project will be transferred into a mining project. After the examination of the CAPEX/OPEX and business plan convince the investors, the processing plants will be erected (Figure 9).

Summary

A number of salars exist worldwide which contains minerals of different chemical components like lithium, potash, sulphur, chloride, natrium etc. To exploit the minerals in the brine of these salt lakes an exploration program has to be carried out. The exploration must be planned and executed in several successive phases. The first phase with literature research, overview measurement results from satellite data or drone flights should be followed by a basic data collection. With the basic data, geological areas can already be delimited with the help of the initial model, which then has to be investigated in more detail with regard to the process planning.

With the resulting information from the geophysical, geological, hydrogeological and chemical investigation a final deposit model will be designed. Based on the final hydrogeological flow model the resource and reserve calculation can be performed. The mineral composition of the brine, the brine exploitation rate and available processing options will lead to a CAPEX/OPEX estimation. With help of these studies, it will be decided, if the exploration phase will be transferred into the mining and production phase.

heiten wie Logistik, Energie und ausgebildete Arbeitskräfte in einen Geschäftsplan für die Ausbeutung des Solefelds übertragen. Diese Informationen werden auch benötigt, um sicherzustellen, dass die Soleproduktion auf ökologisch nachhaltige Weise erfolgt. Wenn diese Schätzungen zusammen mit einem Geschäftsplan eine positive wirtschaftliche Antwort ergeben, wird das Explorations- in ein Bergbauprojekt umgewandelt. Nachdem die Prüfung der CAPEX/OPEX und des Businessplans die Investoren überzeugt hat, werden die Aufbereitungsanlagen errichtet (Bild 9).

Zusammenfassung

Weltweit gibt es eine Reihe von Salzseen, die Mineralien verschiedener chemischer Komponenten wie Lithium, Kali, Schwefel, Chlorid, Natrium usw. enthalten. Um die Mineralien in der Sole dieser Salzseen auszubeuten, muss ein Erkundungsprogramm durchgeführt werden. Die Erkundung muss in mehreren aufeinander folgenden Phasen geplant und durchgeführt werden. Der ersten Phase mit Literaturrecherche, Übersichtsmessungsergebnissen aus Satellitendaten oder Drohnenflügen sollte eine Grunddatenerhebung folgen. Mit den Grundlagendaten können mit Hilfe des Ausgangsmodells bereits geologische Bereiche abgegrenzt werden, die dann im Hinblick auf die Verfahrensplanung näher untersucht werden müssen.

Mit den resultierenden Informationen aus der geophysikalischen, geologischen, hydrogeologischen und chemischen Untersuchung wird ein endgültiges Lagerstättenmodell entworfen. Auf der Grundlage des endgültigen hydrogeologischen Strömungsmodells kann die Ressourcen- und Reservenberechnung durchgeführt werden. Die mineralische Zusammensetzung der Sole, die Ausbeutungsrate der Sole und die verfügbaren Aufbereitungsoptionen werden zu einer CAPEX/OPEX-Schätzung führen. Mit Hilfe dieser Studien wird entschieden, ob die Erkundungs- in die Abbau- und Produktionsphase überführt werden soll.

References / Quellenverzeichnis

- (1) www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Bodengeophysik/Transienten_EM/tem_inhalt.html?nn=1563426 (Online: 07.03.2023)
- (2) www.researchgate.net/figure/Schematic-of-packer-testing-system-for-slug-tests-and-the-mechanics-of-a-pneumatic-rising_fig1_235960136 (Online: 07.03.2023)

Authors / Autoren

EurGeol. Thomas Schicht, EurGeol. Anke Schindler, EurGeol. Anne Allendorf-Schicht, K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen/Germany