

# Wo Salz, Wasser und Gas sich treffen – Kavernenrandbereiche unter Tage und un- ter der Lupe im Forschungsprojekt ProSalz

Bettina Strauch<sup>1</sup>, Julia Arndt<sup>2</sup>, Johannes Barth<sup>2</sup>, Rüdiger Giese<sup>1</sup>, Michael Kühn<sup>1</sup>, Anssi Myrntinen<sup>3</sup>, Heike Richter<sup>1</sup>, Svenja Steding<sup>1</sup>, Martin Zimmer<sup>1</sup>, Axel Zirkler<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<sup>3</sup> K+S Aktiengesellschaft, Kassel

*ProSalz is a BMBF-funded research project that aims for a better process understanding of geochemical and hydrodynamic interactions between different gases, inhomogeneous salts and moisture and their temporal and spatial dimensions in marginal areas of cavernous salt structures. Through the close cooperation of science and industry, issues of result scalability can be addressed because experiments are performed not only in the laboratory and on the computer but also in situ, in an underground mine. This validates the application of the results to real scenarios such as cavern storage facilities and natural cavernous structures in salt deposits.*



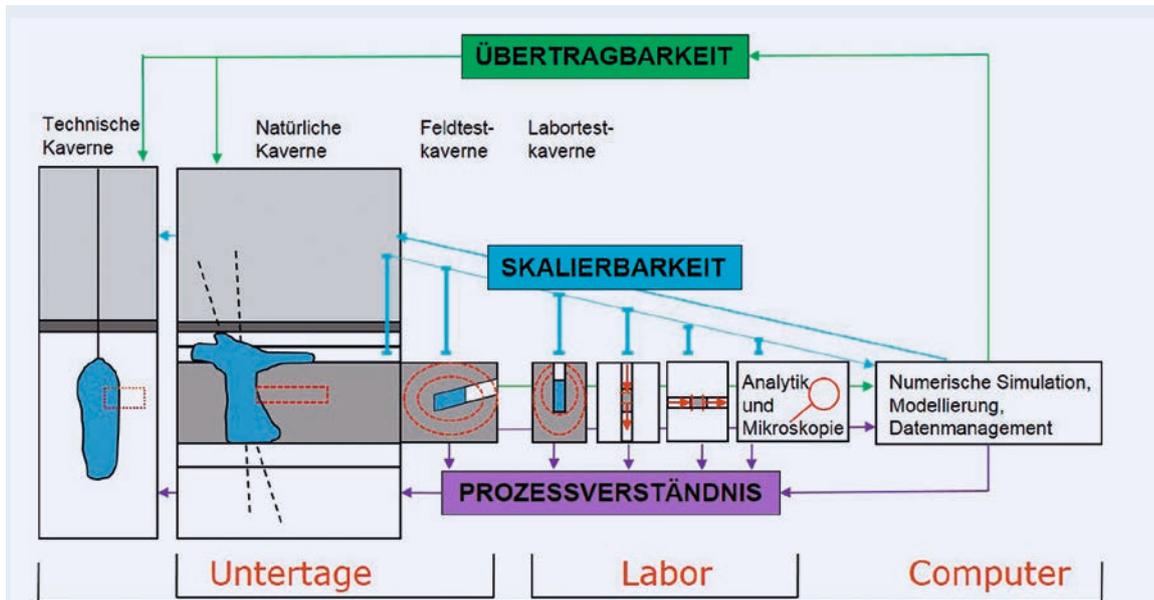


Abb. 1: Schematischer Überblick über die Arbeiten in ProSalz mit Bezug zu den übergeordneten Fragen zum Mehrphasensystem Salz-Wasser-Gas: Welche Prozesse laufen ab und wie? Sind experimentelle mit numerischen Simulationen auf verschiedenen Skalen vergleichbar und letzten Endes auf Speicherkavernen und Salzlösungsvorkommen im Untergrund übertragbar?

Fig. 1: Schematic overview of the work-flow in ProSalz with respect to the overall questions on the multiphase system salt-water-gas: Which processes take place and how? Are, on different scales, experimental and numerical simulations comparable and ultimately applicable to storage caverns and salt solution deposits in the subsurface?

Im Kontext der Energiewende ist die sichere und nachhaltige Nutzung von unterirdischen Kavernen im Salzgestein zur Zwischenspeicherung von Energierstoffen, wie z. B. Erdgas, von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Speicherkavernen sind schon heute im konventionellen Betrieb, doch gilt es, bekanntes Wissen zu erweitern: denn zum einen ist es geplant, die Palette einzuspeichernder Stoffe zu vergrößern, zum anderen muss auf Grund des steigenden Bedarfs an Kavernenspeichern auch die Nutzung inhomogener Salzlager in Erwägung gezogen werden. Zunehmend in den Fokus rückt zudem die Fragestellung, mit welchen Konzepten ausgediente Speicherkavernen nachhaltig sicher verwahrt werden können. Zwar sind natürliche Gase und Salzlösungen

über geologische Zeiträume im Salzgestein gespeichert, gleichwohl können Fluide aber auch Migrationswege zu außerhalb der Salzlagerstätte liegenden Schichten öffnen, was eine Gefahr für Infrastrukturen darstellen kann.

Auch im untertägigen Kali- und Steinsalzabbau bestehen sicherheitstechnische und wirtschaftliche Risiken in Verbindung mit natürlichen Gas- und Salzlösungsvorkommen. Hier wird durch ein besseres Verständnis der natürlich ablaufenden Prozesse eine Optimierung der Prognosemöglichkeiten angestrebt (Strauch et al., 2018a).

Zum geomechanischen Verhalten und zur Integrität von Kavernenspeichern wurden umfangreiche Labor- und Feldtests durchgeführt sowie Modellierungsansätze geschaffen (z. B. Düsterloh und Lux, 2012; Bérest et al., 2007; Lux, 2009). Für das Mehrphasensystem Salz-Wasser-Gas fehlen jedoch Laborstudien hinsichtlich der komplexen geochemischen und hydrodynamischen Prozesse, und die Möglichkeiten der numerischen Simulation sind ohne experimentelle Grundlagen begrenzt.

Links: Blick ins Gestein – dieses 10 m tiefe Großbohrloch im Salz wird verschlossen und der Hohlraum als Feldtestkaverne genutzt. (Foto: M. Zimmer, GFZ)

Left: Deep insight into the rock – the 10 m drill hole will be closed and the cavity used to mimick cavern-like processes in salt



Kontakt: B. Strauch  
(bettina.strauch@gfz-potsdam.de)

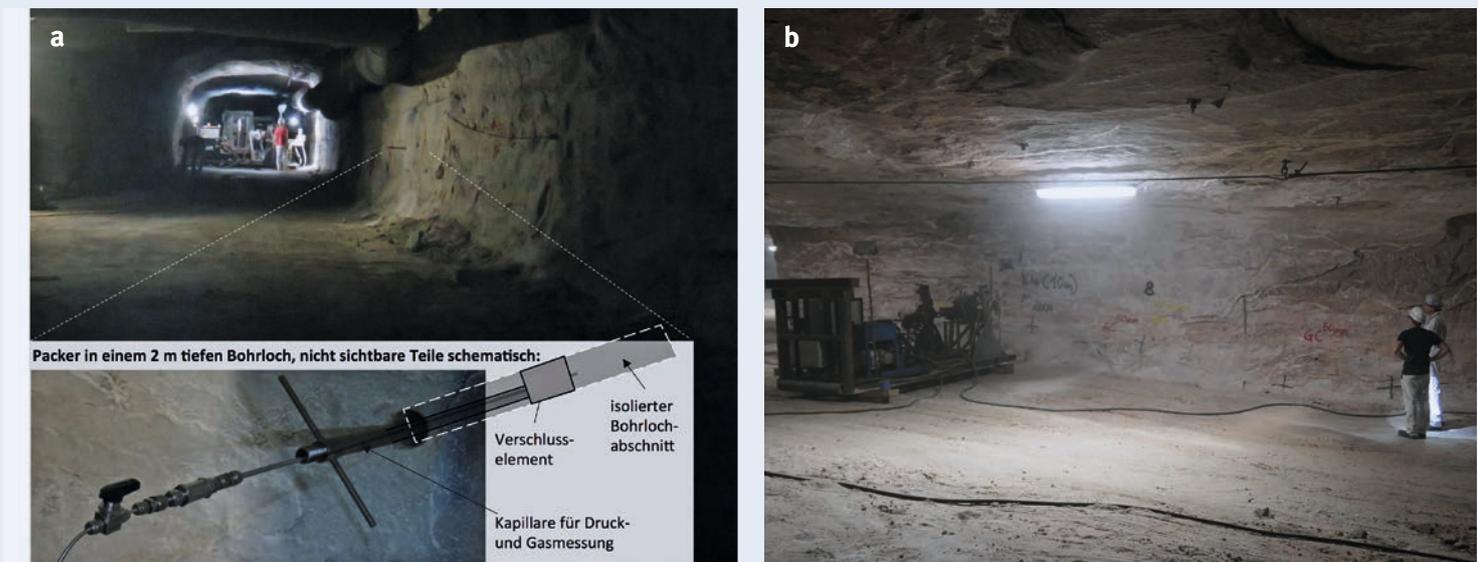


Abb. 2: a) Entlang einer 160 m langen Strecke wurden in regelmäßigen Abständen 2 m lange Bohrkern im Trockenbohrverfahren entnommen, um die Veränderungen von der kavernen Struktur zum unbeeinflussten Gestein im Labor untersuchen zu können. Die Bohrlöcher wurden anschließend mit Packern in 1 m Tiefe verschlossen. So wird im Bohrloch tiefsten ein abgetrennter Hohlraum erzeugt, in dem sich potenziell migrierende Gebirgsgase sammeln können. In monatlichen Intervallen werden der Druckanstieg und die Gaszusammensetzung im Hohlraum ermittelt (Fotos: B. Strauch, GFZ). b) Vorbereitungen am Pfeiler: Rund um einen Salzpfiler, in dessen Mitte eine Feldtestkaverne hergestellt wird, werden Beobachtungsbohrungen für Seismik und Gasmonitoring abgeteuft. In umfangreichen Experimenten sollen hier Prozesse im Randbereich eines Kavernenhohlraums simuliert werden. (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Fig. 2: a) Drill cores of 2 m in length were taken at regular intervals along a 160 m transect in order to investigate geochemical gradients between the cavernous structure and the salt rock. The drill holes were then sealed with packers at a depth of 1 m. Thus, a separate cavity could be created at the deepest part of the borehole in which potentially migrating gases gather. The pressure increase and gas composition in the cavity are then determined on a monthly basis. b) Preparations at the salt pillar: In the middle of which an artificial test cavern will be constructed in addition to drilling of observation wells for seismic surveying and geochemical monitoring. In an extensive range of experiments, processes underway in marginal areas of cavernous salt structures can be simulated.

Im Fokus des Verbundprojekts ProSalz, welches im Fachprogramm „Geo:N – Geoforschung für Nachhaltigkeit“ durch das BMBF gefördert wird (FKZ 03Go873A), stehen deshalb die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gasen, inhomogenen Salzen und Feuchte sowie die Quantifizierung von zeitlichen und räumlichen Dimensionen in Randbereichen kaverner Salzstrukturen. In ProSalz arbeiten Wirtschaft und Wissenschaft eng zusammen: Neben dem Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, das die Projektleitung inne hat, sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg sowie die K+S Aktiengesellschaft und die Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH (UGS) beteiligt. Dieser Verbund ermöglicht es, Fragen der Skalierbarkeit von Untersuchungen anzugehen, indem Prozesse sowohl im Labor und am Rechner simuliert als auch im Untertagelabor, also am anstehenden Salzgestein, beobachtet werden können (Abb. 1). Nur in dieser Kombination ist es möglich, theoretische oder laborbasierte Resultate auf reale Szenarien wie Kavernenspeicherbetriebe und natürliche kavernöse Strukturen in Salzlagerstätten zu übertragen.

## Auf allen Skalen – geochemische Experimente unter Tage und im Labor

Die Durchführung und Bewertung vergleichbarer Experimente auf verschiedenen Skalen stellt die Grundlage für numerische Simulationen dar und bietet die Möglichkeit des „Upscalings“. Durch die Entwicklung übergeordneter Modelle soll die Prognostizierbarkeit von Prozessen verbessert werden, um auch komplexe technische Herausforderungen bewältigen zu können.

Als großskaliges Untersuchungsobjekt des Forschungsvorhabens dient eine in den späten 1950er Jahren entdeckte, natürliche kavernöse Struktur im Grubenfeld eines aktiven Bergwerksbetriebs in Osthessen. Der lösungsbeeinflusste Bereich ist etwa 140 m lang, 60 m breit und 120 m hoch. Die kavernöse Struktur ist ursächlich mit der Ausbildung einer Störungszone im Umfeld des Untersuchungsgebiets verknüpft. Es wird vermutet, dass durch diese Störung mit einem vertikalen Versatzbetrag von bis zu 60 m die salinaren Gesteine Kontakt zu an Stein- und Kalisalzen untersättigten Wässern erhielten und ein langsamer

Lösungsprozess in Gang gesetzt wurde. Mit den Wässern dringt gleichzeitig CO<sub>2</sub>-dominiertes Gas in die Lagerstätte ein, welches den magmatischen Prozessen des tertiären Basaltvulkanismus im Umfeld der Lagerstätte zugeordnet wird.

Dieses natürliche System bietet ideale Voraussetzungen, um Quelle, Dynamik und Mischungen von Fluiden im Salz besser zu verstehen. Hier kann die Übergangszone im Nahbereich einer kavernen Struktur direkt untersucht werden – eine Möglichkeit, die in technischen Speicherkavernen auf Grund ihrer Konstruktion nicht besteht. Zu diesem Zweck wurden in diesem Bereich entlang eines 160 m langen Transekts (Strecke mit Messpunkten in regelmäßigen Abständen) Bohrproben für weiterführende Laboruntersuchungen der Gesteins- und Fluidzusammensetzung entnommen und die 2 m langen Bohrlöcher im Anschluss mit sogenannten Packern verschlossen (Abb. 2a), um durch ein Langzeitmonitoring die Konzentrationen und Zusammensetzung migrierender Gase zu erfassen.

Zudem wird an einer anderen Stelle in einem rund 20 m x 20 m großen Hartsalzpfiler (Abb. 2b) eine Feldtestkaverne hergestellt. Hier werden durch ein variables Befüllen mit Fluiden kavernen-typische Prozesse auf kleinerem Maßstab in situ nachgestellt. Prozesse im Kavernenumfeld können dann mittels Gassensorik, Georadarmessungen und Seismik um den Pfeiler herum beobachtet werden, um die räumliche und zeitliche Fluidausbreitung zu bewerten sowie Rückschlüsse auf Migrationsprozesse im Salinargestein ziehen zu können.

Vergleichend und ergänzend zu den unter Tage durchgeführten Experimenten werden in Laboren des GFZ in klein- und großvolumigen Versuchsaufbauten Kavernenabläufe simuliert und geochemische Fluid-Gestein-Wechselwirkung beobachtet (Abb. 3).

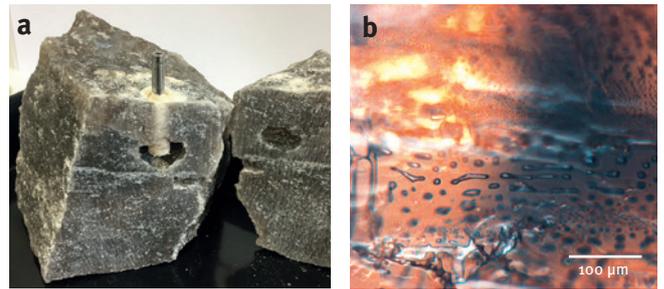


Abb. 3: a) In dezimetergroßen Salzblöcken verschiedener Zusammensetzung werden kavernöse Strukturen erzeugt und deren Randbereiche untersucht. b) Hohlräume auf mikroskopischer Skala: An den Fluideinschlüssen im Salz können die Druck- und Temperaturbedingungen während ihrer Entstehung sowie verschiedene Phasen von Fluidbewegungen rekonstruiert werden. (Fotos: B. Strauch, GFZ)

Fig. 3: a) Cavern-structures are created by leaching in decimeter-sized salt blocks of different composition. These structures are used to observe processes along the cavern rim on a small experimental scale. b) Cavens on a microscopic scale: The fluid inclusions in the salt can be used to reconstruct the pressure and temperature conditions during their formation and different phases of fluid movements.

Beispielsweise wird die Salzmineralogie unter den Einflüssen von Feuchtigkeit, Temperatur und Gas untersucht, um auf den zeitlichen Verlauf von Phasenumwandlungen und Lösungsprozesse der Salze zu schließen. Dazu wird die Probe in einer Feuchtechamber, welche an ein Röntgendiffraktometer gekoppelt ist, in situ analysiert (Abb. 4 rechts). In ersten Experimenten konnte hier die Umwandlung von Carnallit in Sylvin (Abb. 4 links) unter dem Einfluss von Feuchte und verschiedenen Gasen simuliert werden (Strauch et al., 2018b).

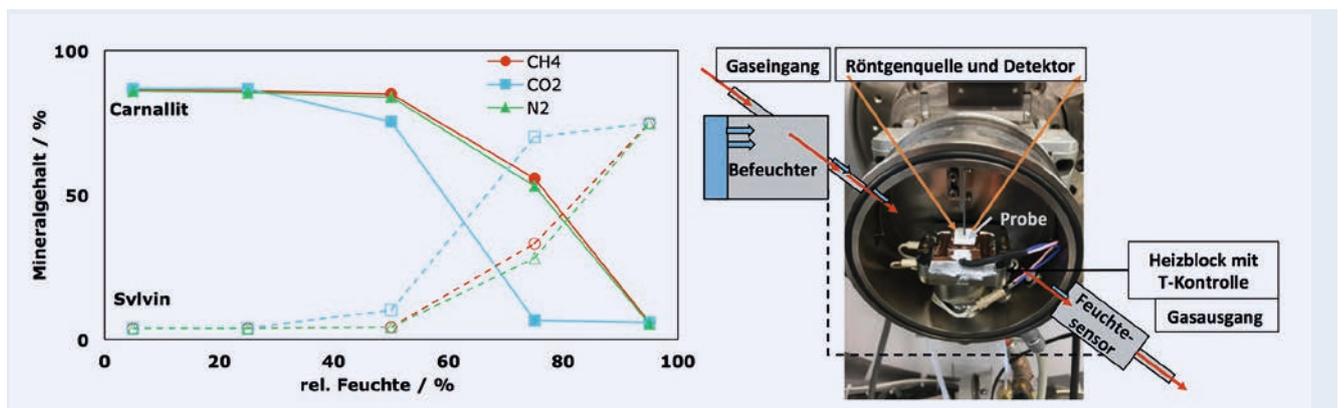


Abb. 4: Beobachtungen in einer Feuchtechamber mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers: Eine carnallitreiche Salzprobe verändert ihre Mineralzusammensetzung zu Gunsten von Sylvin mit zunehmender Feuchte. Auffällig ist die schnellere Mineralumwandlung in Gegenwart von CO<sub>2</sub>.

Fig. 4: XRD observations in a humidity chamber: with increasing humidity, a carnallite-rich salt sample changes its mineral composition in favor of a sylvite. First results also show that this reaction is enhanced by the presence of CO<sub>2</sub>.



Abb. 5: DeltaRay-Infrarot-Spektrometer zur Messung von stabilen Isotopenverhältnissen an CO<sub>2</sub>. Hierbei können sowohl <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C- als auch <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-Verhältnisse gemessen werden. (Foto: S. Meyer, Universität Erlangen-Nürnberg)

Fig. 5: DeltaRay Infrared Spectrometer for the measurement of stable isotope ratios of CO<sub>2</sub>. Both <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C and <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O ratios can be measured.

## Stabile Isotope als Tracer in Salzlagerstätten

Die chemische Zusammensetzung des Salzes gibt Informationen über Herkunft und Lagerungsbedingungen von Salzlagerstätten. Stabile Isotopenverhältnisse des Wassers, oder Isotopenverschiebungen von Gasen im Salz, können darüber hinaus wichtige Hinweise zu Schwächezonen und Interaktionen zwischen Lagerstätte, Gas und Wasser liefern.

Mit neu entwickelten Messinstrumenten (Abb. 5) können CO<sub>2</sub>- und Wasser-Isotopenverhältnisse bestimmt werden, um neben Konzentrationen auch Herkunft und Umsetzungen dieser Phasen näher einzugrenzen. Beispielsweise ist bekannt, dass CO<sub>2</sub> aus tieferen Schichten der Erdkruste und des Erdmantels einen eng vorgegebenen Bereich von <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-Verhältnissen aufweist. Somit können Eindringstellen großer Mengen CO<sub>2</sub> in Minen frühzeitig erkannt werden. Wenn die isotopischen Endpunkte von unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Quellen (z. B. Mantel oder Umgebungsluft) gut charakterisiert sind, lassen sich zudem über Massenbilanzen die Mengen der verschiedenen CO<sub>2</sub>-Gase berechnen.

## Seismische Messungen bringen Licht ins Dunkel

Bei den großskaligen Untersuchungen unter Tage kommt auch Seismik zum Einsatz, wobei sowohl das intakte anstehende Salzgestein als auch Zonen mit natürlich induziertem Fluidtransport untersucht werden. Die Anregung der seismischen Wellen im Festgestein erfolgt über einen magnetostriktiven Vibrator. Über Geophone, die im Festgestein verankert sind, werden die Wellen empfangen, digitalisiert und gespeichert. Im Januar 2018 erfolgte ein zweiwöchiger Messeinsatz unter Tage entlang des oben beschriebenen Transekts zur Erkundung der Übergangszone zwischen ungestörtem Salzgestein und der natürlich gelösten kavernösen Struktur im Vorfeld der Strecken (Abb. 6).

Ein zweiter Versuchsaufbau wird derzeit am untertägigen Salzpfeiler realisiert, um die räumliche und zeitliche Fluidausbreitung um die Feldtestkaverne zu detektieren. Das seismische Monitoring beginnt mit einer Basismessung, gefolgt von mehreren Messungen nach dem Befüllen der Kaverne mit verschiedenen Fluiden. Bei der Größe des Salzpfeilers von etwa 20 m x 20 m werden seismische Wellen mit hohen Frequenzen (100 Hz bis 20 kHz) in das Salzgestein übertragen. Dies ermöglicht eine Auflösung von Strukturen im Zentimeterbereich. Der Einsatz eines ähnlichen seismischen Messsystems soll die Ergebnisse der Feldtestkaverne mit denen der natürlichen kavernösen Struktur vergleichbar machen und damit übertragbar auf verschiedenste lösungsbeeinflusste Randbereiche kavernöser Strukturen natürlichen und künstlichen Ursprungs.

## Simulationen – ein Blick zurück für den Blick nach vorn

Mithilfe numerischer Simulationen wird die Entstehung geogener Kavernen untersucht und gezeigt, was langfristig geschieht, wenn Grundwasser über hydraulische Wegsamkeiten in Kontakt mit Salzgestein kommt. Dabei wird aufgezeigt, welche geochemischen und hydrodynamischen Prozesse zu erwarten sind und in welchen Zeiträumen sie die Bildung kavernöser Strukturen beeinflussen. Um eine bessere Interpretation der anstehenden Salzzusammensetzung zu ermöglichen, werden Mineralumwandlungen im Einflussbereich geogener Salzlösungsvorkommen numerisch simuliert. Die verwendeten Modelle werden mit Labor- und Feld-



Abb. 6: Untertägiger seismischer Messeinsatz im Bergwerk. Die programmgesteuerte seismische Quelle überträgt elastische Wellen in den Untergrund, welche von Sensoren empfangen und über ein Datenakquisitionssystem (DAQLINK) registriert werden. (Fotos: R. Giese, GFZ)

Fig. 6: Seismic survey in the mine. The seismic source transmits elastic waves into the salt rocks which are received by sensors and transferred to the data acquisition system.

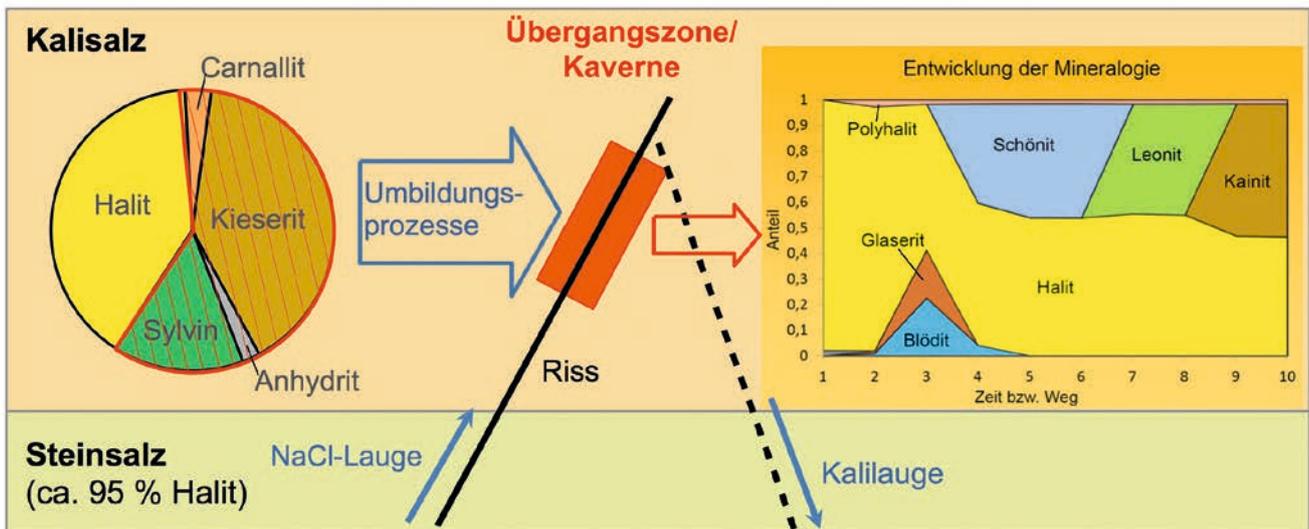


Abb. 7: Modellierung der Prozesse bei der Bildung von Lösungskommen entlang von Wegsamkeiten (z. B. Rissen) im Kalisalz.

Fig. 7: Modelling of the processes involved in the formation of saline solutions along pathways (e. g. cracks) within potash salt deposits.

experimenten kalibriert, validiert und so sukzessive in ihrer Komplexität erhöht, um sich den realen Prozessen anzunähern. Im Kaliflöz ist die Kavernenbildung auf Grund der hohen Löslichkeit der Mineralanteile oft ausgeprägter als im Steinsalz. Im Rahmen von ProSalz wird das Lösungsverhalten verschiedener Kalisalze sowohl numerisch als auch experimentell simuliert (Abb. 7). Die ersten Ergebnisse zeigen, dass einige Anteile des Kalisalzes beim Kontakt mit Sole in Lösung gehen, während andere kaum reagieren. Infolgedessen stellt eine Kaverne hier keinen klar abgegrenzten Hohlraum dar, sondern ist eher von einer porösen Schwammstruktur umrandet. Mithilfe der Modellierungsergebnisse können die Ausbildung und Beschaffenheit der Übergangszone sowie die Mineralogie des angrenzenden Gesteins dargestellt werden. Die Kopplung von Geochemie und Hydraulik des Stofftransports dient der räumlichen Auflösung der Prozesse in Übergangszonen zwischen Festgestein und Kaverne. Auf diese Weise werden die Entstehungsgeschichte der Kaverne qualitativ und quantitativ erfasst und Entwicklungsprognosen ermöglicht.

## Ausblick

Der interdisziplinäre Ansatz von ProSalz vereint die unterschiedlichen Herangehensweisen und Untersuchungskonzepte der Geophysik, Geochemie, Modellierung und der Salzindustrie. In ihrer Kombination können so Prozesse in Kavernenrandbereichen auf verschiedenen Skalen bestmöglich verstanden werden. Die Ergebnisse legen den Grundstein für eine faktenbasierte Bewertung von Salzlösungskommen natürlichen oder künstlichen Ursprungs und eine frühzeitige Abschätzung möglicher Gefährdungspotenziale wenn Salz, Wasser und Gas sich treffen. Darüber hinaus liefern die Daten einen wertvollen Beitrag zur Kavernenspeicherkonzeption, von der Standortsuche bis zur Stilllegung.

## Danksagung

Den Mitarbeitern der K+S KALI GmbH und dem technischen Personal am/des GFZ gebührt besonderer Dank für die Unterstützung bei der Probennahme und der technischen Umsetzung der Experimente unter Tage und im Labor.

## Literatur

- Bérest, P., Brouard, B., Karimi-Jafari, M., Van Sambeek, L. (2007): Transient behavior of salt caverns – interpretation of mechanical integrity tests. – In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 5, pp. 767–786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2006.11.007>
- Lux, K.-H. (2009): Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. – In: Evans, D. J., Chadwick, R. A. (Eds.), *Underground gas storage: worldwide experiences and future development in the UK and Europe*, (Geological Society special publications; 313), London: Geological Society, pp. 93–128. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP313.7>
- Lux, K.-H., Düsterloh, U. (2012): Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche und Modellierung. – In: Projektträger Karlsruhe Wasertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE (Hrsg.), *Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen: Abschlussveranstaltung des BMBF-Förderschwerpunktes*, 14. und 15. Februar 2012 am KIT Campus Nord, (Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE; 13), pp. 328–384.
- Strauch [Beeskow-Strauch], B., Zirkler, A., Myrntinen, A. (2018a): Das Forschungsprojekt ProSalz: Prozessverständnis, Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von reaktivem Mehrphasentransport in Salzlagerstätten. - *Kali und Steinsalz*, 02/2018, pp. 18–29.
- Strauch [Beeskow-Strauch], B., Zimmer, M., Zirkler, A., Höntzsch, S., Schleicher, A. M. (2018b): The influence of gas and humidity on the mineralogy of various salt compositions – implications for natural and technical caverns. - *Advances in Geosciences*, 45, pp. 227–233. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-227-2018>