FORSCHUNG

Geologisches Screening von Gesteinsvorkommen für die CO_2-Mineralisation in der Schweiz

Ergebnisse des Projekts CARBOSTORE-CH

Hauptautor: Redaktion SASEG · **DOI:** 10.1234/geonews.2025.001
https://geonews.southvision.de/beitrag/geologisches-screening-co2-mineralisation-schweiz/



Im Rahmen des Projekts CARBOSTORE-CH wurden im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) und mit finanzieller Unterstützung des Verbands der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) die Anwendungsmöglichkeiten für die CO_2-Mineralisation in geogenen Wirtgesteinsvorkommen in der Schweiz untersucht. Die Untersuchung umfasst die Identifikation von reaktiven Mineralien und daraus abgeleitet die Festlegung von potenziell reaktiven Wirtgesteinen in der Schweiz.

Abstract

As part of the CARBOSTORE-CH project, the potential for CO_2 mineralization of natural rock formations in Switzerland was investigated on behalf of the Swiss Federal Office of

Energy (SFOE) and with the financial support of the Association of Operators of Swiss Waste Utilisation Plants (VBSA). The investigation includes the identification of reactive minerals and, derived from this, the definition of potentially reactive host rocks in Switzerland.

A. Florentin Ladner[1], Daniela van den Heuvel[2], Larryn W. Diamond[2], Moira Arnet[1]
[1] GEOTEST AG, Freilager-Platz 3, CH-4142 Münchenstein
[2] Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern

1 Einleitung

Im Rahmen der 91. Jahrestagung 2025 der SASEG in Basel wurden die Ergebnisse des Projektes CARBOSTORE-CH präsentiert. Dieses Projekt wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) und mit finanzieller Unterstützung des Verbandes der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) ausgeführt und untersuchte die Anwendungsmöglichkeiten für die CO_2-Mineralisation in geogenen Wirtgesteinsvorkommen in der Schweiz. Die GEOTEST AG und die Rock-Water Interaction Group der Universität Bern bildeten dafür eine Arbeitsgemeinschaft. Die Gesamtprojektleitung lag dabei bei der GEOTEST AG. Als Industriepartner agierte der VBSA. Begleitet wurde das Projekt durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU), die Swisstopo und die Cemsuisse. In diesem Artikel werden die wichtigsten Erkenntnisse des Projektes CARBOSTORE-CH zusammengefasst. Der ausführliche Schlussbericht ist auf der Forschungsdatenbank der Bundesverwaltung ARAMIS publiziert und öffentlich zugänglich (Ladner et al., 2023).

2 Geologische Speicherung von CO_2 als Fluid

Der geologische Untergrund bietet zahlreiche Möglichkeiten, CO_2 langfristig und sicher zu speichern. Mehrere der Optionen sind mit dem aktiven resp. bereits erfolgten Abbau von fossilen Brennstoffen (d.h. Erdöl, Erdgas und Kohle) verbunden (Fig. 1).

Bereits ausgebeutete Öl- und Gasreservoire können direkt mit CO_2 aufgefüllt werden. Diese Reservoire haben gezeigt, dass sie über die nötigen Durchlässigkeiten und Volumina verfügen und über geologische Zeiträume dicht sind. Dadurch sind sie ideale Formationen für die Sequestrierung von CO_2. Weiter erfolgt CO_2-Sequestrierung als Nebenprodukt der Kohlenwasserstoffproduktion durch *enhanced oil recovery* (verbesserte Ölgewinnung). Dabei werden durch die Injektion von CO_2 Reste von Öl und Gas im Reservoir mobilisiert,

während das injizierte CO_2 im Untergrund verbleibt. Ein ähnliches Vorgehen wird bei der *enhanced coal bed methane recovery* (Methangewinnung aus Kohleflözen) angewendet (z.B. White et al., 2005). Dabei wird CO_2 in nicht abbauwürdige Kohleflöze gepumpt, wo es das absorbierte Methan auf der Kohleoberfläche ersetzt. So wird einerseits Erdgas mobilisiert, welches mittels konventioneller Methoden nicht produziert werden kann, und gleichzeitig CO_2 im Untergrund sequestriert. Die Sorption von CO_2 auf Kohle kann auch ohne Produktion von Methan in nicht abbauwürdigen tiefen Kohleflözen erfolgen und dient dann ausschliesslich der CO_2-Sequestrierung (Fig. 1).

Alle diese Methoden finden Anwendung in verschiedenen Regionen weltweit, die reich an fossilen Rohstoffen sind (z.B. USA, Kanada, China, Polen). In der Schweiz hingegen sind all diese Speicherungsoptionen kaum relevant, da keine grösseren Kohlenwasserstoff- und Kohlevorkommen bekannt sind (Leu, 2012). In der Schweiz wurde bisher nur ein einziges und sehr kleinräumiges Erdgasfeld durch die Tiefbohrung Finsterwald im Kanton Luzern erschlossen, welches zwischen 1985 und 1994 ausgebeutet wurde. Insgesamt konnten ca. 74 Mio. m^3 Gas gefördert werden (Lahusen et al., 1995). Die Bohrung wurde anschliessend verfüllt.

In der Schweiz sind Kohlevorkommen mit bis zu 4 m mächtigen Kohleflözen aus der Bohrung Weiach im Nordschweizerischen Permokarbontrog bekannt. Pini et al. (2010) haben das Sorptionspotential dieser Kohleflöze untersucht und kamen zum Schluss, dass ihre Eignung für die CO_2-Sequestrierung eher gering ist. Zahlreiche weitere Permokarbontröge werden im Schweizer Untergrund vermutet. Ob sie kohleführend sind und, wenn ja, welche Eigenschaften die Kohleflöze aufweisen, ist jedoch unbekannt.

Eine vielversprechendere Sequestrierungsoption für die Schweiz ist die Speicherung von superkritischem CO_2 in salinen Aquiferen im Schweizer Mittelland. Diese Option wurde im Rahmen eines BFE-Projektes (Diamond et al., 2010) im Detail untersucht. Die damit verbundene Potenzialstudie (Chevalier et al., 2010) basiert auf rein geologischen Kriterien und Daten aus über 150 wissenschaftlichen Publikationen sowie nicht veröffentlichten Daten aus der Kohlenwasserstoffexploration in der Schweiz. Diese Daten wurden anhand des modifizierten Bewertungsschemas für CO_2-Speicherung in tiefen Aquiferen (Chadwick et al., 2008) evaluiert. Es zeigte sich, dass die sedimentären Gesteine im Molassebecken und, zu einem gewissen Grad, die äquivalenten Formationen im Jura ein mässiges bis hohes Potential für die CO_2-Sequestrierung aufweisen. Mindestens vier Sandstein- oder Karbonatreservoire kommen in grossen Teilen des Molassebeckens und unterhalb des

Juragebirges im gewünschten Tiefenbereich (800–2500 m) vor. Werden alle geologischen Kriterien zusammen betrachtet, ergibt sich vor allem für die Region Fribourg – Olten – Luzern ein Sequestrationspotential von > 0.6 (Maximum = 1). Das theoretische Speichervolumen in diesem Gebiet liegt bei ungefähr 2’680 Mt CO_2. Das Resultat aus dieser Literaturstudie ist somit vielversprechend, muss aber durch detailliertere Untersuchungen bestätigt oder ggf. angepasst werden. Für den triassischen Muschelkalk wurde das Potential im zentralen bis östlichen Molassebecken bereits genauer untersucht (Diamond et al., 2019). Es zeigte sich dabei, dass vor allem die petrophysikalischen Eigenschaften der Formation in grösseren Tiefen schlechter (d.h. weniger porös und durchlässig) sind als erwartet. Das tatsächliche Potenzial dürfte deshalb tiefer ausfallen als ursprünglich von Chevalier et al. (2010) bestimmt.

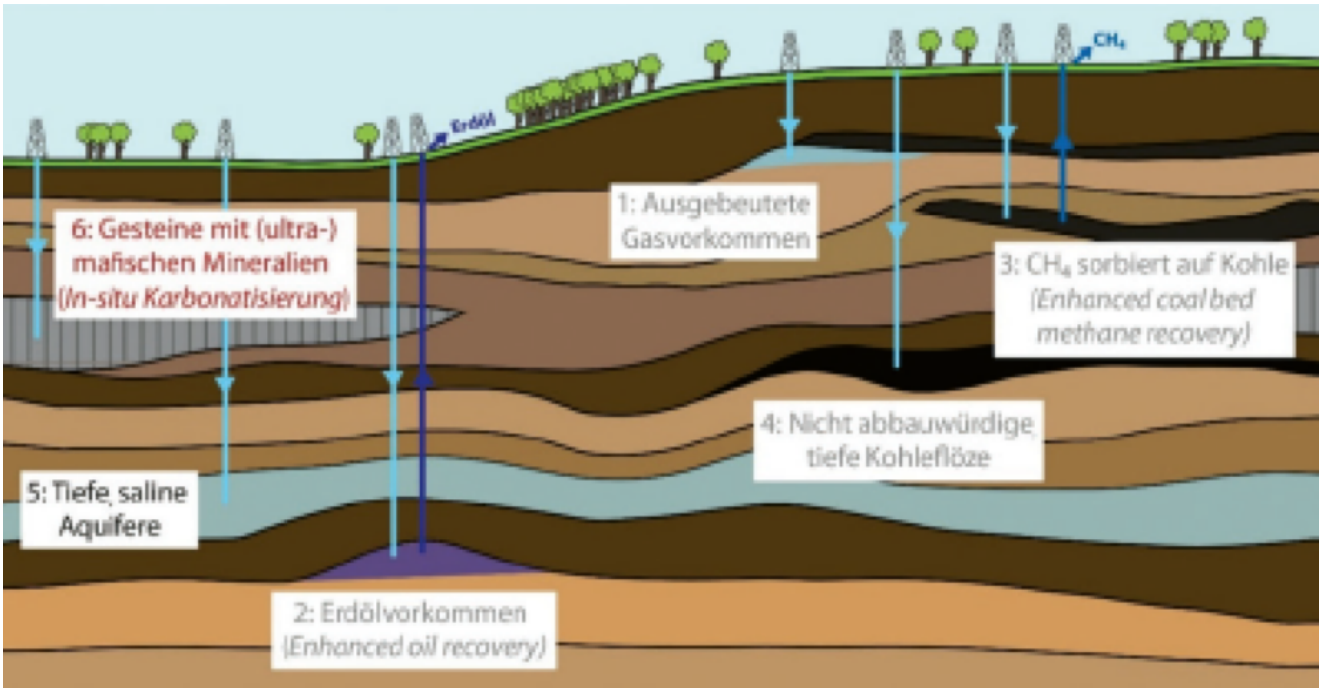


Fig. 1: Optionen für geologische CO_2-Sequestrierung. Für die Optionen 1–4 ist das Potential in der Schweiz aufgrund fehlender fossiler Rohstoffe gering (siehe Text). Das Potential für CO_2-Speicherung in tiefen, salinen Aquiferen wurde von Chevalier et al. (2010) im Detail untersucht. Die In-situ-Karbonatisierung (Option 6) ist Gegenstand der vorliegenden Studie.



3 Geologische Speicherung von CO_2 als karbonatischer Feststoff (CO_2-Mineralisierung)

Im Fokus stehen zwei Methoden der CO_2-Mineralisation mit[2] mafischen / ultramafischen Mineralien:

Tab. 1: Methoden der CO_2-Mineralisation.

Methode	Verfahren
Ex-situ	Der Abbau, die Zerkleinerung und der Transport von reaktiven, mafischen und ultramafischen Mineralien zu einem Standort, an welchem CO_2 in abgeschiedener Form als Fluid vorliegt. Die Karbonatisierung findet anschliessend unter kontrollierten Bedingungen (pH, Temperatur und Druck) in einem verfahrenstechnisch konzipierten Reaktorbehälter beschleunigt statt.
In-situ	Das CO_2 wird über Bohrungen in ein Gesteinsvorkommen mit reaktiven, mafischen und ultramafischen Mineralien injiziert. Bei natürlich vorhandener Permeabilität zirkuliert das CO_2 im Gestein und wird mineralisiert.

Chemische Reaktionen der CO_2-Mineralisation

Das grundlegende Prinzip der CO_2-Mineralisation oder Karbonatisierung (in situ oder ex situ) beschreibt die Bildung von Karbonatmineralien aus CO_2, Wasser und bivalenten Kationen (z.B. Ca^{2+}), welche aus einer geologischen Formation resp. einem abgebauten Gestein herausgelöst werden. Dieser Prozess besteht aus drei Schritten und findet auf natürliche Art und Weise in der Natur statt.

Schritt 1

Das gasförmige CO_2 ($CO_2(g)$) löst sich in Wasser ($CO_2(aq)$) und bildet mit Kohlensäure folgendes Gleichgewicht:

$$CO_2(g) \leftrightarrow CO_2(aq) \tag{1}$$

$$CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3(aq)$$

Schritt 2

Die im Reservoir vorhandenen Silikatmineralien – hier als Beispiel Mg-Olivin – werden durch die Kohlensäure aufgelöst und setzen bivalente Kationen frei. Dies wird durch eine Erniedrigung des pH – verursacht durch die Lösung von CO_2 im Formationswasser – begünstigt:

$$Mg_2SiO_4 + 4\ H_2CO_3(aq) \leftrightarrow 2\ Mg^{2+} + 4\ HCO_3^-(aq) + H_4SiO_4(aq) \tag{2}$$

Schritt 3

Die Kationen verbinden sich mit den in Lösung vorhandenen Bikarbonat-Ionen (HCO_3^-) und fallen als feste Karbonatmineralien – in diesem Beispiel Magnesit ($MgCO_3$) – aus:

$$HCO_3^-(aq) + Mg^{2+} \leftrightarrow MgCO_3(s) + H^+(aq) \tag{3}$$

Diese drei Schritte zusammengefasst ergeben für die Karbonatisierung von Mg-Olivin folgende chemische Reaktionsgleichung:

$$Mg_2SiO_4 + 2\ CO_2 + 2\ H_2O \leftrightarrow 2\ MgCO_3(s) + H_4SiO_4 \tag{4}$$

Das Nebenprodukt H_4SiO_4 ist unbedenklich und fällt normalerweise als amorphes Gel aus, das mit der Zeit zu Quarz (SiO_2) dehydriert. Analog zum Beispiel des Mg-Olivins können theoretisch alle Mineralien karbonatisieren, welche bivalente Kationen enthalten (aber kein CO_2). Die häufigsten Kationen sind dabei Ca, Mg und Fe, welche die Karbonatmineralien Kalzit ($CaCO_3$), Magnesit ($MgCO_3$), Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) und Siderit ($FeCO_3$) bilden. Unter gewissen Bedingungen (d.h. T < 65 °C) bilden sich stattdessen hydratisierte Karbonate wie z.B. Hydromagnesit ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$) oder Nesquehonit ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$). Andere bivalente Kationen (z.B. Mn, Sr, Zn oder Pb) können ebenfalls Karbonatmineralien bilden, kommen aber in den meisten Gesteinsformationen nicht in genügend hohen Konzentrationen vor, um für die Karbonatisierung von Interesse zu sein. Gewisse andere Kationen, die in Gesteinen sehr häufig vorkommen (insbesondere Si und Al), bilden keine stabilen Karbonatmineralien. Daraus folgt, dass die Gesteine mit den höchsten Gehalten an Ca, Mg und Fe und den niedrigsten Gehalten an CO_2 (alle Angaben auf Molbasis, nicht auf Gewichtsbasis) die am besten geeigneten Ausgangsstoffe für die Karbonatisierung sind. Optimale Gesteine sind also durch Mol(Ca+Mg+Fe) – Mol(CO_2) ≈ 1 charakterisiert.

Vom chemischen Standpunkt sind die am besten für die Karbonatisierung geeigneten Gesteine mafische und ultramafische magmatische Gesteine (v.a. Basalt und Peridotit), ihre metamorphen Äquivalente (z.B. Grünschiefer und Serpentinite) sowie einzelne sedimentäre Formationen (z.B. Sandsteine mit viel Glaukonit oder Hämatit; Hills et al., 2020).

Vorteil der CO_2-Mineralisation in mafischen und ultramafischen Gesteinen

Der Vorteil der CO_2-Mineralisation liegt in der Kinetik der chemischen Reaktionen. Diese laufen mit mafischen und ultramafischen Gesteinen um Faktoren schneller ab als beispielsweise bei der Sequestrierung von CO_2 in salinen Aquiferen. Bei salinen Aquiferen ist deshalb eine integre, stabile Deckschicht («caprock») zwingend, damit das CO_2 nicht entweichen kann. Bei der CO_2-Mineralisation in mafischen und ultramafischen Gesteinen wird das CO_2 so schnell mineralisiert und in einen über geologische Zeiträume stabilen Zustand gebracht, dass die Gefahr eines unerwünschten Entweichens von CO_2 kleiner ist.

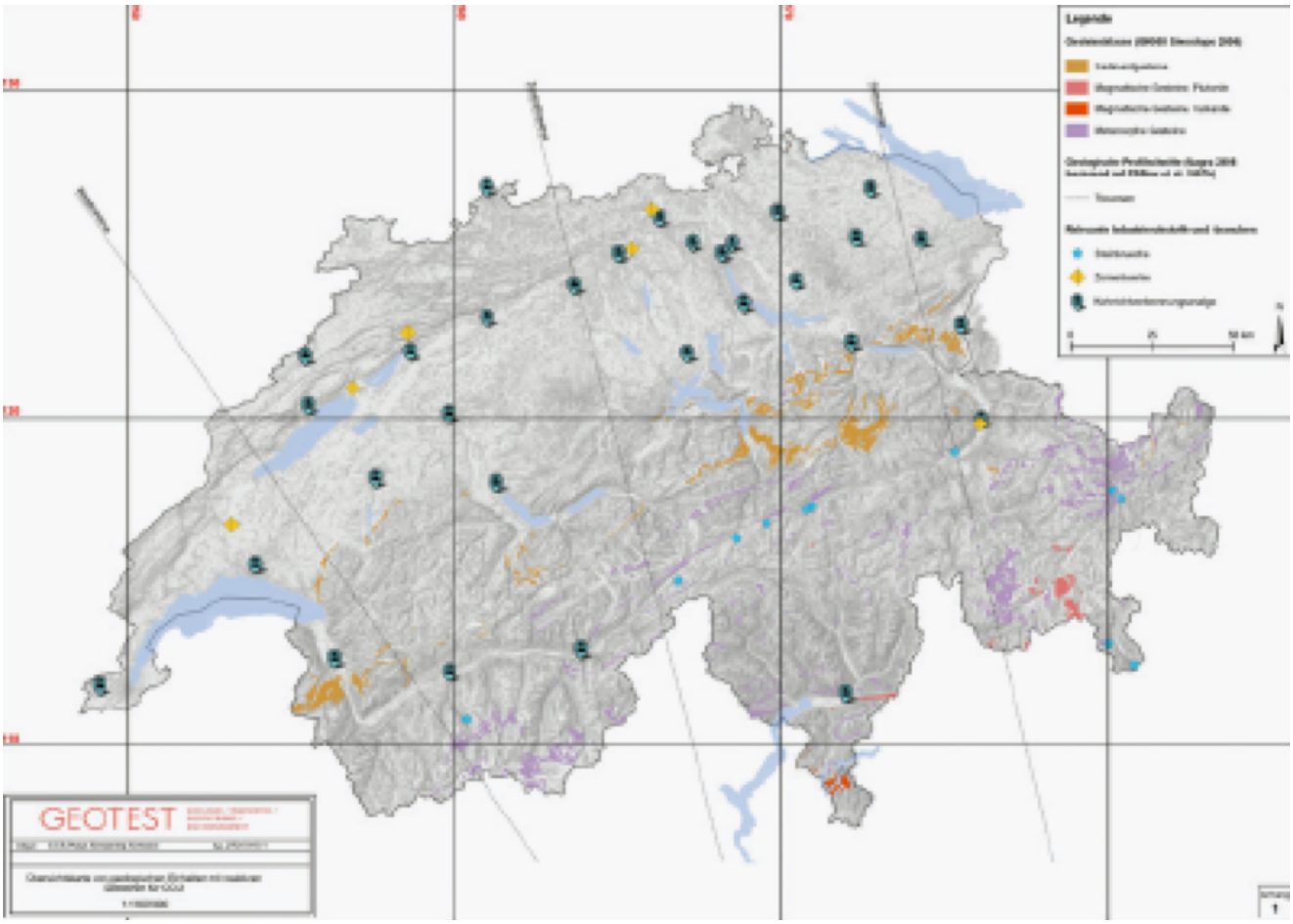


Fig. 2: Resultat des Screenings von Gesteinsvorkommen für CO_2-Mineralisation in der Schweiz.

Literaturverzeichnis

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. 2008: Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects (Vol. 14). British Geological Survey.

Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. 2010: Potential for deep geological sequestration of CO_2 in Switzerland: a first appraisal. Swiss Journal of Geosciences 103, 427–455.

Diamond, L.W. 2019: Revised potential of the Upper Muschelkalk Formation (Central Swiss Plateau) for CO_2 storage and geothermal electricity. Slides of an oral presentation at the SCCER-SoE Annual Conference at EPFL-Lausanne, 4.9.2019.

Diamond, L.W., Leu, W. & Chevalier, G. 2010: Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO_2-Sequestrierung. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE (SI/500325-01 und SI/500386-02), Bern, 23 pp.

Hills, C.D., Tripathi, N. & Carey, P.J. 2020: Mineralization technology for carbon capture, utilization, and storage. Frontiers in Energy Research 8, 142.

Ladner, F., van den Heuvel, D., Arnet, M. & Diamond, L.W. 2023: CARBOSTORE-CH. Geologisches Screening von Gesteinsvorkommen für CO_2-Mineralisation in der Schweiz. Schlussbericht.

White, S.K., Spane, F.A., Schaef, H.T., Miller, Q.R., White, M.D., Horner, J.A. & McGrail, B.P. 2020: Quantification of CO_2 mineralization at the Wallula Basalt Pilot project. Environmental Science & Technology 54(22), 14609–14616.

Stichworte: Alpen, CO2-Speicherung, Forschung, Geologie