
CO₂LPIE — CO₂ Long-term Periodic Injection Experiment (CL)

David Jaeggi¹, Martin Ziegler¹, Rolf Kipfer², Gesa Ziefle³

¹ Schweizerische Landestopographie, Felslabor Mont Terri, St. Ursanne

² Eawag: Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Deutschland

Abstract

Das CL-Experiment untersucht die hydraulischen, mechanischen und chemischen (HMC) Auswirkungen der CO₂-Injektion in der ungestörten, heterogenen und anisotropen sandigen Fazies des Opalinuston unter In-situ-Bedingungen im Felslabor Mont Terri. Das Experiment zielt darauf ab, unser allgemeines Verständnis für das Verhalten von Deckgestein und dessen Integrität zu verbessern, wobei der Schwerpunkt auf CO₂ liegt. Dabei ist der Einblick in geochemische Reaktionen wichtig, da diese die Zusammensetzung des Tongesteins und die hydrogeomechanischen Gesteinseigenschaften beeinflussen. Experimentelle Daten zu Reaktionsgeschwindigkeiten und Barriere-Eigenschaften mit angemessener Genauigkeit sind erforderlich, um zuverlässige Simulationen des reaktiven Transports als Grundlage für die Charakterisierung von Speicherstätten und die Risikobewertung der langfristigen Speicherintegrität durchzuführen. Bislang werden jedoch nur Daten aus Laborexperimenten in kleinem Maßstab (einige Zentimeter) verwendet, während realistische Daten in großem Maßstab (über der Größenordnung von Metern) der heterogenen Gesteinsmatrix noch nicht verfügbar sind. Das CL-Experiment wird diese Lücke schließen. Ein weiterer wichtiger Aspekt von CL ist sein neuartiger Überwachungsansatz, der Multisensorsysteme umfasst, die eine robuste Charakterisierung des Testvolumens, Basislinienmessungen und eine Überwachung mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung während der Injektionsphase ermöglichen. In diesem Kurzbericht erläutern wir das finale Konzept des In-situ-Experiments, den Zeitplan und die geplanten Arbeiten.

Einleitung und Motivation

Seit 2010 werden im Felslabor Mont Terri (MT URL) im Opalinuston Forschungsarbeiten zu CO₂ durchgeführt. In Bezug auf CO₂ wurden und werden Forschungsexperimente zur Erforschung der Bohrlochintegrität und der Störungsintegrität durchgeführt. Diese Experimente haben wichtige Erkenntnisse geliefert, z. B. über Maßnahmen zur Abdichtung von CO₂-Bohrungen (z. B. Goodman et al. 2023) und über die hydromechanischen Bedingungen, die zu Gas-/Flüssigkeitsleckagen entlang tektonischer Brüche führen können (z. B. Guglielmi et al. 2021; Zappone et al. 2021). Im Rahmen des CO₂-Speicherkonzepts werden jedoch seismisch festgestellte Verwerfungen vermieden und intakte Deckschichten avisiert. Die Matrixeigenschaften des Deckgesteins Opalinuston wurde bereits an kleinmaßstäblichen Proben untersucht und nachgewiesen (z. B. Makhnenko et al., 2017), doch muss dies noch auf dem realistischeren (d. h. heterogenen und sandigen) Felslabormaßstab demonstriert werden. Das CO₂LPIE (CL)-Experiment zielt darauf ab, diese Lücke zu schließen.

In-situ Experiment und laufende Arbeiten

Das CL-Experiment wird in einer bestimmten Nische in der südwestlichen Ecke des Mont Terri Felslabors durchgeführt. Mit insgesamt 6 senkrecht zur Schichtung gebohrten Bohrungen soll dort die Sandige Fazies des Opalinuston geophysikalisch und geochemisch untersucht werden. Das Konzept sieht vier Überwachungsbohrungen (BCL-5 bis BCL-8) vor, die eine Injektions- (BCL-9) und eine Extraktionsbohrung (BCL-10) für CO₂-Experimente umschliessen (Abbildung 1). Eine perspektivische Ansicht der Bohrlochanordnung ist in der Abbildung 1 gegeben. Die wichtigsten Schritte des CL-Experiments umfassen:

- a. Entwicklung eines modularen Multi-Sensor-Monitoringsystems (MMMS) – erledigt
- b. Prüfung und Feinabstimmung des MMMS-Designs in Bohrlöchern (BCL-3 und BCL-4) – erledigt
- c. Bohrung, geologische Aufnahme, Probenahme und Installation des MMMS in vier Überwachungsbohrlöchern (BCL-5 bis BCL-8) – ab 22. Januar-Mitte März 2024
- d. Charakterisierung des experimentellen Gesteinsvolumens und Basisüberwachung – März bis Juli 2024
- e. Bohrung, Protokollierung, Probenahme und Installation von CO₂-Injektions- und Extraktionsbohrungen (BCL-9 und BCL-10) sowie hydraulische Tests – August 2024
- f. Injektion von CO₂-angereicherter, mit Edelgasen markierter Sole und langfristige chemische, geophysikalische und hydromechanische Überwachung (3+ Jahre) – Oktober/November 2024
- g. Bohrungen, Probenahmen und Laboranalysen von Gesteinsproben in Kontakt mit CO₂ (optionale zukünftige Bohrungen) – 2026/27, tbd

Momentan befindet sich das Projekt bei Schritt c. Schritte a und b sind erfolgreich abgeschlossen worden. In jedem Überwachungsbohrloch wird ein MMMS installiert. Die vier MMMS umfassen im angestrebten Tiefenbereich von 10-16 m entlang der Bohrung etwa 380 Elektroden für die elektrische Widerstandstomographie, 12 akustische Sender- und Empfängerpaare für die aktive Übertragung und akustische Überwachung, 8 faseroptische Sensorleitungen für Dehnung und Temperatur (entlang 0-16 m), 20 Pt1000-Temperatursensoren und vier Porendruckintervalle (in etwa 17.3-17.5 m Tiefe). Das finale Layout des Injektions- und Extraktionssystems (Kontrolle der Injektion und Probenahme) wird derzeit diskutiert, und die endgültigen Positionen der CO₂-Injektionsintervalle werden auf der Grundlage der Ergebnisse der Gesteinscharakterisierung festgelegt. Für das Basisdesign des Injektionsbohrlochs sind zwei Hauptinjektionsintervalle geplant, die bei etwa 12 und 14 m zentriert sind (blau markiert bei BCL-9 in Abbildung 1). Dies ermöglicht die Injektion von CO₂ in petrographisch und/oder hydraulisch unterschiedliche Gesteinsmassen. Darüber hinaus sind in der Vorplanung des Injektionsbohrlochs zusätzliche Kontrollintervalle vorgesehen. Diese Intervalle werden für die Überwachung des Porendrucks, chemische online-Indikatoren (pH/EC), Flüssigkeits-/Gasprobenahmen oder zusätzliche Injektionen genutzt. Da sich die wichtigsten Überwachungssensoren des MMMS in 10-16 m Tiefe befinden, umschließen sie das Injektions- und Extraktionsvolumen (11-15 m Tiefe) und ermöglichen somit die Festlegung der idealen Position des Injektionsintervalls bzw. der Injektionsintervalle in dieser Lücke.

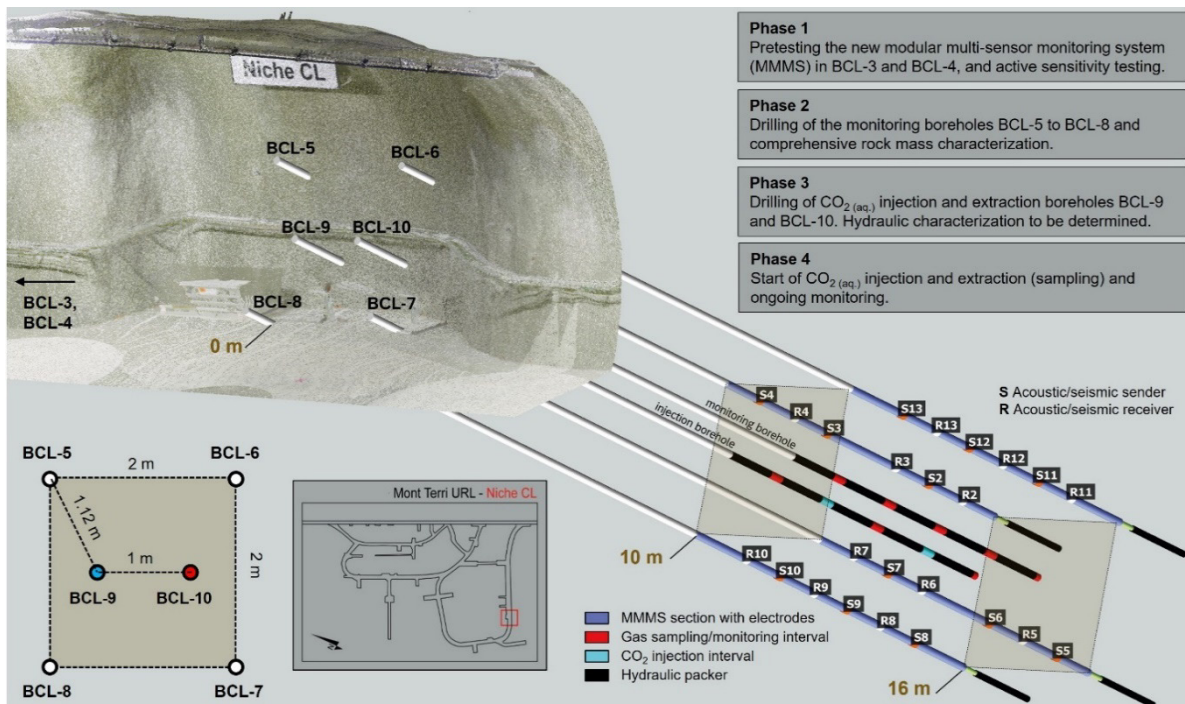


Abbildung 1: Laserscan-Modell der CL Nische im Felslabor Mont Terri. Die Bohrungen BCL-5 bis BCL-8 werden mit MMMS bestückt, BCL-9 ist für die Injektion und BCL-10 für die Extraktion vorgesehen. Markiert ist die Zielteufe von 10-16 m mit der Lage der Intervalle und akustischen Sensoren.

Nach der Befüllung der Injektionsintervalle mit künstlichem Porenwasser und einer ersten Ausgleichsphase werden massgeschneiderte hydraulische Tests durchgeführt, um die hydraulischen Eigenschaften des Experimentvolumens zu charakterisieren. Das Injektionsprotokoll mit den Ergebnissen der numerischen Modellierung und den analytischen Ergebnissen verglichen (Ma et al. 2022; Sciandra et al. 2023, eingereicht). Nach der hydraulischen Charakterisierung und einer weiteren Ausgleichsphase findet der eigentliche Injektionstest mit CO₂-angereichertem Wasser statt. Die CO₂-angereicherte Sole wird in BCL-9 nach einem genau definierten Protokoll injiziert, das auf dem gemessenen hydrostatischen Druck, sowie der Größe und Länge der geplanten Fluidinjektionsschwingungen basiert. Eine vereinfachte Skizze ist in Abbildung 2 dargestellt. Geplant sind maximale Drucke von 3.5 MPa, um keine Brüche zu erzeugen. Das CO₂ wird in künstlichem Porenwasser gelöst injiziert und mit Kr und einer vordefinierten Isotopenzusammensetzung ($\delta^{13}C$) markiert, um als Tracer für das injizierte Fluid zu dienen. Schließlich werden die Intervalle von BCL-10 für die gas- und hydrochemische Überwachung vor Ort (Probenahme) genutzt.

Geplante off-site Analysen und Dissertationen

Aus den 6 geplanten Bohrungen werden Kernproben entnommen und bezüglich Mineralogie, Petrophysik, geologischen Strukturen, Porenwasserzusammensetzung, Edelgasen, poromechanischen Eigenschaften und CO₂ Transport untersucht. Zudem werden weiterhin auf verschiedensten Skalenbereichen numerische Simulationen der geochemischen, mechanischen und hydraulischen Prozesse durchgeführt. Dazu wurde eine eigene

Modellierungsgruppe geschaffen, welche sich unter dem Lead von BGR ausschliesslich mit den Prozessen bei CL befasst.

Im Rahmen des CL Experiments werden 2 Dissertationen im ETH Bereich finanziert und zwar über die CO₂-Injektion und die hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse (ETH SED) und über die geochemische Charakterisierung des Experiments mit Hilfe der Membrantechnologie und MiniRuedi Gasspektrometer (Eawag). Diese Dissertationen werden einen wichtigen Teil der vorgesehenen experimentellen Feldarbeiten abdecken. Weitere extern über das EU-Projekt SMILE finanzierte Dissertationen befassen sich ausschliesslich mit Themen der numerischen Simulation von Prozessen, welche während der CO₂-Injektion ablaufen.

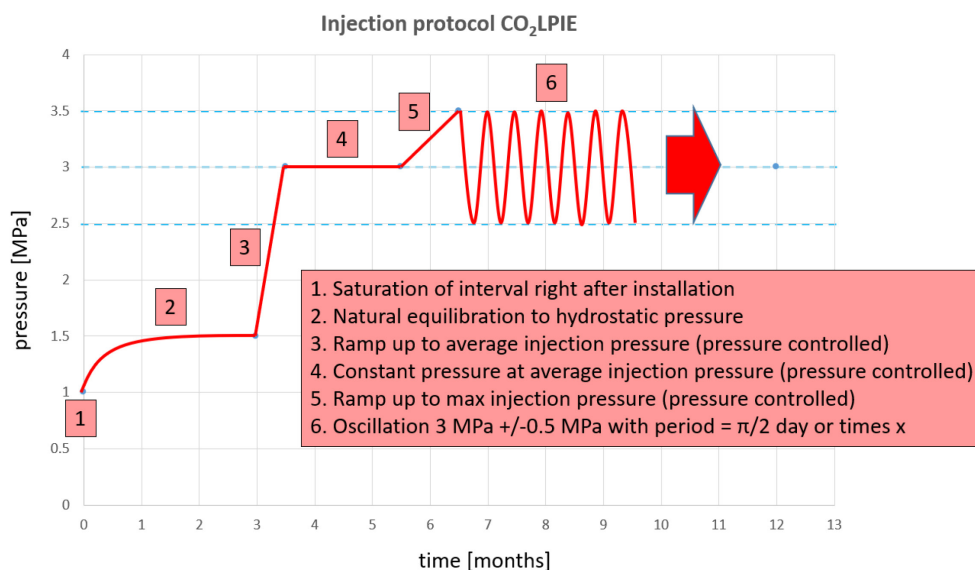


Abbildung 2: Injektionsprotokoll (geplant) des mit CO₂ angereicherten Porenwassers in die Bohrung BCL-9.

Referenzliste

- Goodman, H, Rösli, U, Gisiger, J, Jaeggi, D, Minnig, C. 2023. CS-A Experiment: Synthesis report of CS-A work activities Sealant test outcomes that address seepage of CO₂ behind casing. Mont Terri Technical Report TR2022-02.
- Guglielmi, Y, Nussbaum, C, Cappa, F, De Barros, L, Rutqvist, J, Birkholzer, J. 2021. Field-scale fault reactivation experiments by fluid injection highlight aseismic leakage in caprock analogs: Implications for CO₂ sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 111, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103471>.
- Ma, J, Wersin, P, Alt-Epping P. 2022. Scoping tests on the CL experiment. Mont Terri Technical Note TN2022-65.
- Makhnenko, RY, Vilarrasa, V, Mylnikov, D, Laloui, L. 2017. Hydromechanical aspects of CO₂ breakthrough into clay-rich caprock. *Energy Procedia*, 114, 3282–3290.
- Sciandra D, Iman R, Kivi, I, Makhnenko, RY, Rebscher, D, Vilarrasa, V. 2023 (submitted). Characterization of hydraulic rock diffusivity using oscillatory pore pressure. Manuscript submitted to *Water Resources Research*.
- Zappone, A., Rinaldi, AP, Grab, M, Wenning, QC, Roques, C, Madonna, C, Obermann, AC, Bernasconi, SM, Brennwald, MS, Kipfer, R, Soom, F, Cook, P, Guglielmi, Y, Nussbaum, C, Giardini, D, Mazzotti, M, and Wiemer, S. 2021. Fault sealing and caprock integrity for CO₂ storage: an in-situ injection experiment, *Solid Earth*, 12, 319–343, <https://doi.org/10.5194/se-12-319-2021>.