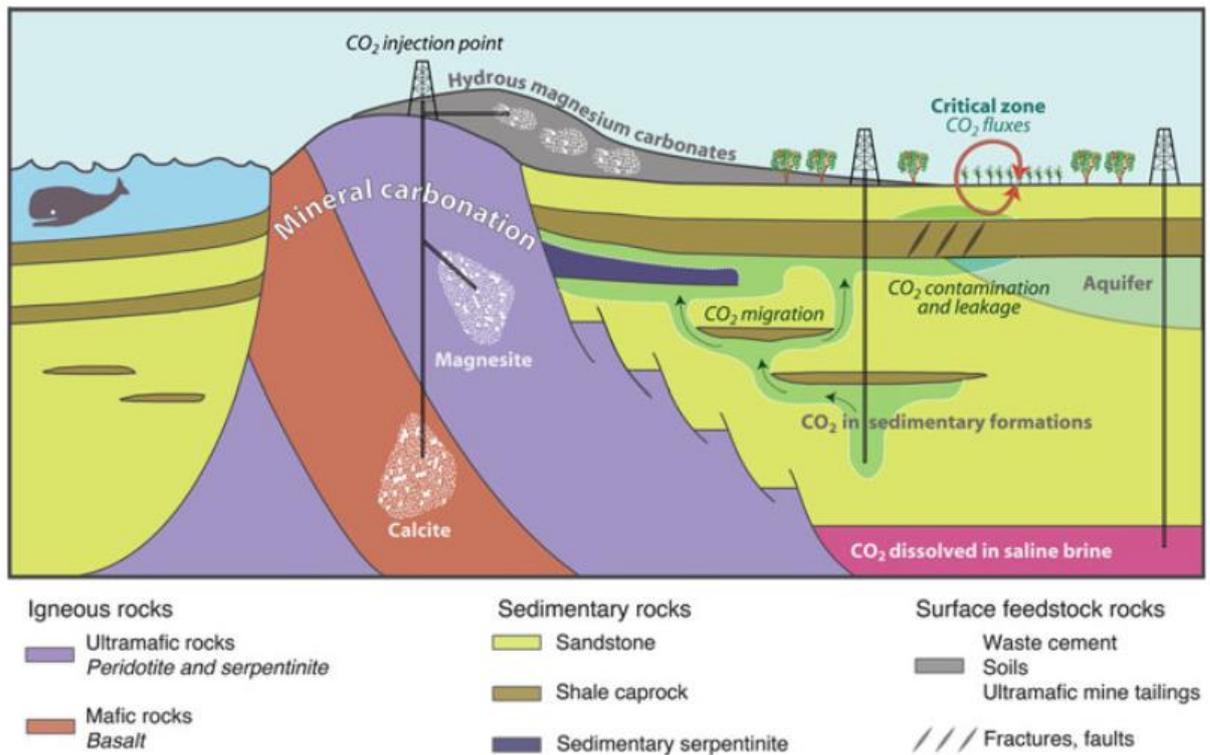




Schlussbericht vom 23.11.2023

CARBOSTORE-CH

Geologisches Screening von Gesteinsvorkommen für CO₂-Mineralisation in der Schweiz



Quelle: Garcia del Real et al. (2016).



GEOTEST

u^b UNIVERSITÄT
BERN



Datum: 01.11.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Verband der Betreiber schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA)
Robin Quartier
Wankdorffeldstrasse 102, CH-3014 Bern
www.vbsa.ch

Subventionsempfänger/innen:

GEOTEST AG
Freilager-Platz 3, CH-4142 Münchenstein
www.geotest.ch

Universität Bern, Rock-Water Interaction Group
Institut für Geologie
Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern

Autor/in:

Florentin Ladner, florentin.ladner@geotest.ch
Dr. Daniela B. van den Heuvel, daniela.vandenheuvel@unibe.ch
Maira Arnet, Geotest, moira.arnet@geotest.ch

QS:

Dr. Larryn W. Diamond, larryn.diamond@unibe.ch
Nicolas Stork, nicolas.stork@geotest.ch / Felix Bussmann, felix.bussmann@geotest.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Valentin Gischig, valentin.gischig@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502540-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

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 CO₂-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. Für die potenziell reaktiven Wirtgesteine wurde ein Screening (Verortung) auf der Basis des öffentlich zugänglichen Vektordatensatzes GeoKarten 500 der geologischen und tektonischen Karte der Schweiz im Massstab 1:500'000 durchgeführt.

Das Resultat dieser Untersuchung zeigt, dass in der Schweiz Wirtgesteinsvorkommen mit reaktiven Mineralien für die Karbonatisierung auftreten. Flächenmässig den grössten Anteil nehmen in der Schweiz metamorphe und plutonische Wirtgesteine (z.B. Peridotit, Serpentin oder Amphibolit) ein, die in den Alpen und südlich davon auftreten. Als sedimentäre Wirtgesteine wurden die Taveyannaz-Sandsteine identifiziert, die mit dem Nordhelvetischen Flysch assoziiert sind. Die metamorphen und plutonischen Wirtgesteine weisen tendenziell höhere Anteile an reaktiven Mineralien (20 – 50 Gew.-%) und damit eine tendenziell höhere theoretische Speicherkapazität auf ($t_{CO_2} / t_{Gestein} \sim 0.2 - 0.5$) als die sedimentären Wirtgesteine (15 – 20 Gew.-% resp. $t_{CO_2} / t_{Gestein} \sim 0.1 - 0.2$). Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen und den derzeit zur Verfügung stehenden Verfahren zur CO₂-Mineralisierung gehen wir davon aus, dass in der Schweiz die ex-situ Karbonatisierung von metamorphen und plutonischen Wirtgesteinen das höchste Potenzial aufweist. Die geologischen Voraussetzungen für die in-situ Karbonatisierung werden in der Schweiz als schwierig beurteilt und das Potenzial ist mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Résumé

Dans le cadre du projet CARBOSTORE-CH, les possibilités d'application de la minéralisation du CO₂ dans les gisements de roches d'accueil géogènes en Suisse ont été étudiées sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et avec le soutien financier de l'Association suisse des exploitants d'installations de traitement des déchets (ASED). L'étude comprend l'identification des minéraux réactifs et, à partir de là, la définition des roches d'accueil potentiellement réactives en Suisse. Pour les roches d'accueil potentiellement réactives, un screening (localisation) a été effectué sur la base du jeu de données vectorielles GeoKarten 500, accessible au public, de la carte géologique et tectonique de la Suisse à l'échelle 1:500'000.

Le résultat de cette étude montre qu'il existe en Suisse des gisements de roches d'accueil contenant des minéraux réactifs pour la carbonatation. En termes de surface, les roches d'accueil métamorphiques et plutoniques (p. ex. péridotite, serpentinite ou amphibolite), présentes dans les Alpes et au sud de celles-ci, représentent la plus grande part en Suisse. Les grès de Taveyannaz, associés au flysch de l'Helvétie du Nord, ont été identifiés comme des roches hôtes sédimentaires. Les roches hôtes métamorphiques et plutoniques ont tendance à présenter des proportions plus élevées de minéraux réactifs (20 - 50 % en poids) et donc une capacité de stockage théorique tendanciellement plus élevée ($t_{CO_2} / t_{roches} \sim 0,2 - 0,5$) que les roches hôtes sédimentaires (15 - 20 % en poids, respectivement $t_{CO_2} / t_{roches} \sim 0,1 - 0,2$). Sur la base des résultats de l'étude et des procédés actuellement disponibles pour la minéralisation du CO₂, nous partons du principe qu'en Suisse, la carbonatation ex-situ des roches d'accueil métamorphiques et plutoniques présente le plus grand potentiel. Les conditions géologiques pour la carbonatation in-situ sont jugées difficiles en Suisse et le potentiel est entaché de grandes incertitudes.



Summary

As part of the CARBOSTORE-CH project, the potential for CO₂ 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. For the potentially reactive host rocks, a screening was carried out based on the publicly available vector data set GeoKarten 500 of the geological and tectonic map of Switzerland at a scale of 1:500,000.

This study shows that host rock formations with reactive minerals for CO₂ mineralization indeed occur in Switzerland. In terms of outcrop area, the most abundant reactive formations in Switzerland are metamorphic and plutonic rocks (e.g. peridotite, serpentinite or amphibolite) that occur in the Alps and to the south of the Alps. Also of interest are sedimentary sandstones belonging to the Taveyannaz formation within the North Helvetic Flysch. The metamorphic and plutonic host rocks tend to have higher proportions of reactive minerals (20 - 50 wt.%) and thus higher theoretical storage capacities ($t_{CO_2} / t_{rock} \sim 0.2 - 0.5$) than the sedimentary host rocks (15 - 20 wt.% resp. $t_{CO_2} / t_{rocks} \sim 0.1 - 0.2$). Based on the results of the investigations and the currently available methods for CO₂ mineralization, we conclude that ex-situ carbonation of metamorphic and plutonic host rocks has the highest potential to permanently store CO₂ in Switzerland. The geological conditions for in-situ carbonation are judged to be difficult in Switzerland and its potential is subject to great uncertainties.

Take-home messages

- Die Schweiz verfügt über metamorphe, magmatische und untergeordnet sedimentäre Wirtgesteinsvorkommen, die grundsätzlich in der Lage sind, CO₂ chemisch zu binden und langfristig zu speichern.
- Die metamorphen und magmatischen Wirtgesteinsvorkommen liegen in den Alpen und südlich davon in den Kantonen Wallis, Tessin und Graubünden. Die sedimentären Wirtgesteinsvorkommen sind mit dem Nordhelvetischen Flysch (Taveyannaz-Sandstein) assoziiert, der schweizweit in einem ost-west gerichteten Band entlang der Voralpen vorkommt.
- Für die Schweiz wird derzeit das Potenzial für eine ex-situ Karbonatisierung höher eingeschätzt als das Potenzial für die in-situ Karbonatisierung.
- Es wird empfohlen das technische Speicherpotenzial für die ex-situ Karbonatisierung weiter abzuklären.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage.....	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	9
1.4 Organisation	9
2 Geologische CO₂-Speichermöglichkeiten – Stand des Wissens in der Schweiz	11
3 CO₂-Mineralisation.....	14
3.1 Prinzip.....	14
3.2 Methoden und Technologiereife	15
3.2.1 Ex-situ Karbonatisierung	15
3.2.2 Oberflächige Karbonatisierung.....	15
3.2.3 In-situ Karbonatisierung.....	15
4 Screening von Vorkommen in der Schweiz.....	18
4.1 Genereller Workflow	18
4.2 Reaktive Mineralien	18
4.2.1 Methodik	18
4.2.2 Resultat.....	19
4.3 Potenzielle Wirtgesteine	19
4.3.1 Methodik	19
4.3.2 Resultat.....	19
4.4 Verortung / Screening von Wirtgesteinen in der Schweiz	23
4.4.1 Methodik	23
4.4.2 Resultat.....	25
4.5 Geochemische Überprüfung.....	27
4.5.1 Methodik	27
4.5.2 Resultat.....	27
5 Diskussion der Resultate.....	32
6 Schlussfolgerungen	34
6.1 Schlussfolgerungen	34
6.2 Ausblick	35



7	Literaturverzeichnis	36
8	Anhang	39



Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
CCS	CO ₂ -Abscheidung und Sequestrierung (= Einlagerung resp. Speicherung von CO ₂ im Untergrund).
Cemsuisse	Verband der schweizerischen Zementindustrie
EMPA	Eidgenössische Mess- und Prüfanstalt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
Ex-situ	Ortsverschoben und an der Oberfläche
Gew.- %	Einheit für den Mineralbestand eines Gesteins in Gewichtsprozent
In-situ	Vor Ort im geologischen Untergrund
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
mD	Einheit für Permeabilität in millidarcy
NET	Negativemissionstechnologien
UniBE	Universität Bern
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VBSA	Verband der Betreiber schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
Vol.-%	Einheit für den Mineralbestand eines Gesteins in Volumenprozent



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Auf eidgenössischer Ebene werden im Bericht des Bundesrates im Inland für die dauerhafte CO₂-Speicherung folgende Zielsetzungen in Form von Richtwerten gesteckt (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2022):

- Pionierphase bis 2030: Rasch zur ersten grosstechnischen Anwendung

Bis 2030 sollen in der Pionierphase erste Schritte hin zur Anwendung und zum Ausbau von CCS und Negativemissionstechnologien (NET) gemacht werden. Als Richtwert wird für das Jahr 2030 die dauerhafte Speicherung von rund 500'000 Tonnen CO₂ im In- oder/und Ausland angestrebt.

In Bezug auf die inländische CO₂-Speicherung kommt bis 2030 primär die Karbonatisierung von Baustoffen wie Beton infrage, da geologische Speicherstätten bis dahin noch nicht entwickelt sein werden. Diese sind gemäss Schätzungen des BFE frühestens in 15 – 20 Jahren betriebsbereit, sofern die Erkundung des Untergrundes erfolgreich verläuft. Dazu ist ein nationales Programm zur Erkundung des Untergrundes in Arbeit (vgl. Ziff. 2.2, Mo. 20.4063). Erste Pilotversuche zur CO₂-Speicherung im Schweizer Untergrund könnten an geeigneten Standorten vor 2030 beginnen.

- Gezielte Skalierung von 2031 bis 2050: Neue CO₂-Netzwerke und Infrastrukturen nötig

Das in der Schweiz abgeschiedene CO₂ soll gemäss der langfristigen Klimastrategie nach Möglichkeit im Inland im Untergrund oder in langlebigen Produkten, etwa Baustoffen, gespeichert werden. Der Richtwert für die inländische geologische CO₂-Speicherung gemäss den Energieperspektiven 2050+ beträgt im Jahr 2050 3 Mio. Tonnen CO₂. Dazu wären mehrere geologische Speicherstätten nötig, die erfolgreich erkundet und erschlossen werden müssten.

Der Branchenverband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) hat die vom Bundesrat gesteckten Zielsetzungen aufgenommen und unterzeichnete am 16. März 2022 mit dem UVEK eine Vereinbarung über CO₂ Abscheidung und Speicherung. Die Vereinbarung hat zum Ziel, mit Hilfe von neuen Technologien den CO₂-Austoss der Abfallverwertungsanlagen langfristig auf null resp. in den negativen Bereich zu bringen. Dabei verpflichtet sich der VBSA langfristig in Forschung und Entwicklung der Schlüsseltechnologie «*Carbon Capture and Storage (CSS)*» zu investieren und spätestens 2030 eine erste CO₂-Abscheidungsanlage in Betrieb zu nehmen.

1.2 Motivation des Projektes

Carbon Capture & Storage (CCS) wird generell als Schlüsseltechnologie zur Eindämmung des CO₂-Anstieges in der Atmosphäre resp. der Klimaerwärmung betrachtet. In der Stellungnahme vom 20.02.2019 auf das Postulat 18.4211 (Thorens Goumaz, 12.12.2018) kommt der Bundesrat zum Schluss, dass weltweit CO₂-Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts auf netto null reduziert werden müssen. Massnahmen zur Emissionsverminderung müssen ergänzt werden mit Negativemissionstechnologien, die eine Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (Capture) und eine dauerhafte Einlagerung in natürliche und/oder technische Senken erlauben (Storage).

Am 18. Juni 2023 haben die Schweizer Stimmberechtigten das Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG) angenommen. Das Klima- und Innovationsgesetz sieht unter anderem vor, dass der Bund die Unternehmen auch auf dem Weg zur Klimaneutralität finanziell unterstützt. Er sichert ihnen bis 2030 Finanzhilfen für die Anwendung von neuartigen, klimafreundlichen Technologien und Prozesse zu. Darunter fallen auch Technologien, die CO₂ dauerhaft und sicher speichern.



«CCS through mineral carbonation» respektive «CCS durch CO₂-Mineralisierung» erweitert die Anwendung der geologischen CO₂-Speicherung und eröffnet neue Möglichkeiten weltweit. Bei der CO₂-Mineralisierung reagiert CO₂ mit reaktivem Gestein. Chemische Reaktionen führen zu einer Karbonat-Mineralisierung und dadurch zu einer permanenten Bindung von CO₂ im Gestein. In Island und den USA wird resp. wurde diese Technologie in-situ in mafischen und ultramafischen Gesteinen erfolgreich getestet. Neben in-situ kann CO₂ auch ex-situ oder oberflächlich (surficial) chemisch gebunden und der Atmosphäre permanent entzogen werden. Das Potenzial für in-situ Karbonatisierung in der Schweiz schätzten Diamond et al. (2010) und Siddiqi & Leu (2013) als gering ein. Damals gingen sie allerdings von der Annahmen aus, dass für die in-situ Karbonatisierung eine Temperatur von > 150 °C notwendig sei, was einerseits die technische Machbarkeit (Permeabilität nimmt mit zunehmender Tiefe ab) sowie auch die Wirtschaftlichkeit (Tiefbohrungen sind kostenintensiv) in Frage stellt. Zwischenzeitlich zeigen neue Erkenntnisse aus Island, dass die in-situ CO₂-Mineralisierung in unmetamorphen, glasigen Basalten bei deutlich tieferen Temperaturen (unter 50 °C) ablaufen. Im Bereich von ex-situ und oberflächiger Karbonatisierung wurden ebenfalls Fortschritte in Forschung und Entwicklung erzielt.

Vor diesem Hintergrund ist deshalb eine Re-Evaluation des Potenzials für CO₂-Mineralisierung in der Schweiz angebracht.

1.3 Projektziele

Die Zielsetzung dieser Desktop-Studie war ein geologisches Screening von geeigneten Gesteinsvorkommen für die CO₂-Karbonatisierung in der Schweiz durchzuführen und daraus erste Schlüsse für das Anwendungs- resp. Speicherpotenzial zu ziehen. Im Fokus steht die CO₂-Karbonatisierung mit reaktiven Wirtgesteinen im Untergrund (in-situ) oder an der Oberfläche («surficial» oder ex-situ). Diese Methoden zur CO₂-Speicherung ist besonders seit den erfolgreichen Versuchen in Island in den Fokus gerückt, wo im Rahmen einer Pilotanlage erfolgreich CO₂ im Untergrund durch Karbonatisierung gespeichert werden konnte. Im Gegensatz zur CO₂-Sequestrierung in flüssiger Form in ausgebeuteten Gas- / Ölfeldern oder salinen Aquiferen ist die CO₂-Karbonatisierung in fester Form (in-situ, surficial oder ex-situ) in der Allgemeinheit weniger bekannt und deren Anwendungsmöglichkeiten wurde in der Schweiz bislang wenig untersucht.

1.4 Organisation

Das Projekt CARBOSTORE-CH wurde beauftragt und finanziell unterstützt durch das BFE (Abbildung 1). Die GEOTEST AG und die Rock-Water Interaction Group der Universität Bern bildeten für das Projekt eine Arbeitsgemeinschaft. Die Gesamtprojektleitung lag dabei bei der GEOTEST AG. Als Industriepartner agierte der VBSA, der finanziell das Projekt unterstützte. Die folgenden Akteure begleiteten das Projekt: BAFU, Swisstopo und die Cemsuisse,

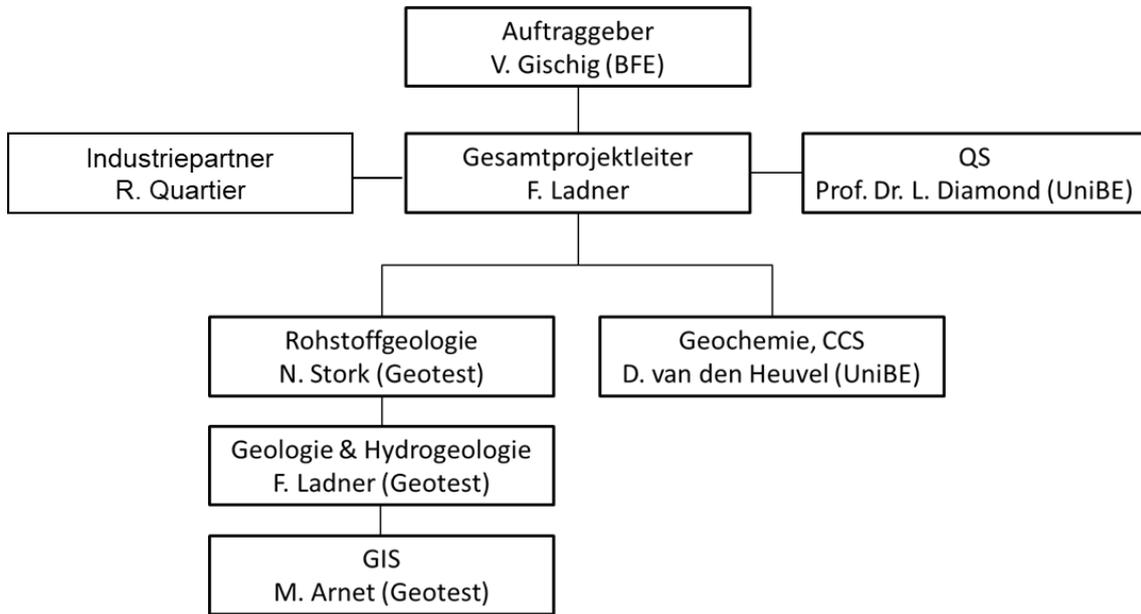


Abbildung 1: Projektorganisation CARBOSTORE-CH



2 Geologische CO₂-Speichermöglichkeiten – Stand des Wissens in der Schweiz

Der geologische Untergrund bietet zahlreiche Möglichkeiten, CO₂ 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 (Abbildung 2).

Bereits **ausgebeutete Öl- und Gasreservoirs** können direkt mit CO₂ aufgefüllt werden. Diese Reservoirs 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 CO₂. Weiter erfolgt CO₂ Sequestrierung als Nebenprodukt der Kohlenwasserstoffproduktion durch **enhanced oil recovery** (verbesserte Ölgewinnung). Dabei werden durch die Injektion von CO₂ Reste von Öl und Gas im Reservoir mobilisiert, während das injizierte CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ im Untergrund sequestriert. Die Sorption von CO₂ auf Kohle kann auch ohne Produktion von Methan in **nicht abbauwürdigen tiefen Kohleflözen** erfolgen und dient dann ausschliesslich der CO₂-Sequestrierung (Abbildung 2).

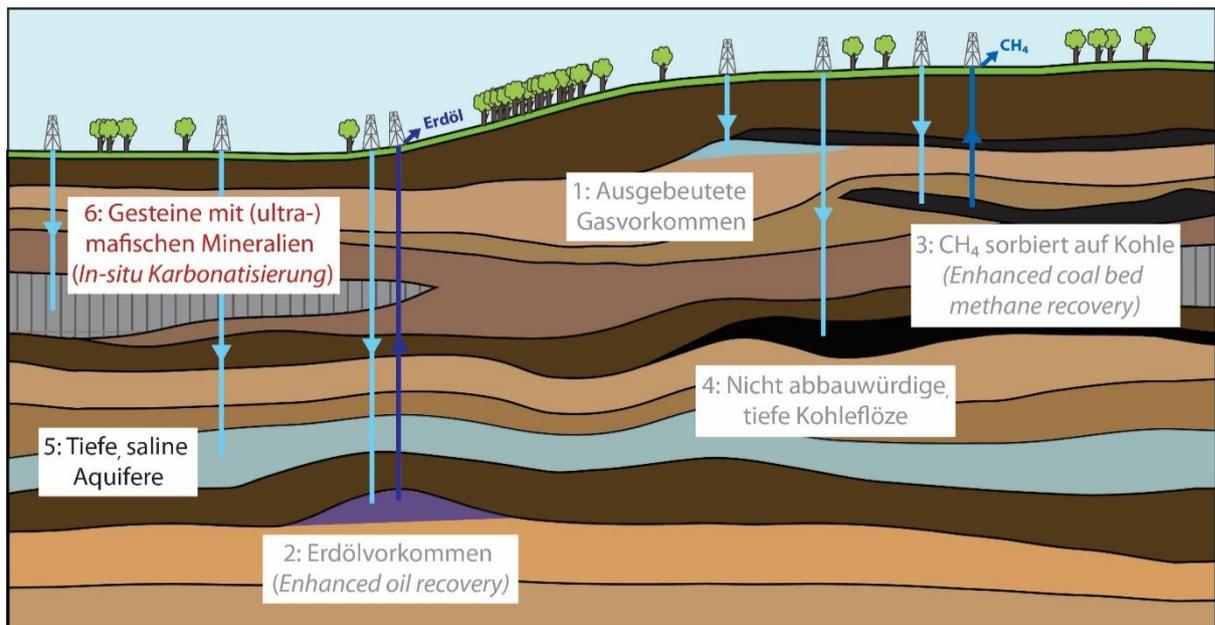


Abbildung 2: Optionen für geologische CO₂-Sequestrierung. Für Optionen 1-4 ist das Potential in der Schweiz aufgrund fehlender fossiler Rohstoffe gering (siehe Text für weitere Ausführungen). Das Potential für CO₂-Speicherung in tiefen, salinen Aquiferen wurde von Chevalier et al. (2010) im Detail untersucht. Die in-situ Karbonatisierung (Option 6) ist Gegenstand der vorliegenden Studie.

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 konnte ca. 74 Mio. m³ 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 Permokarbontrög bekannt (Abbildung 3). Pini et al. (2010) haben das Sorptionspotential dieser Kohleflöze untersucht und kamen zum Schluss, dass ihre Eignung für die CO₂-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.

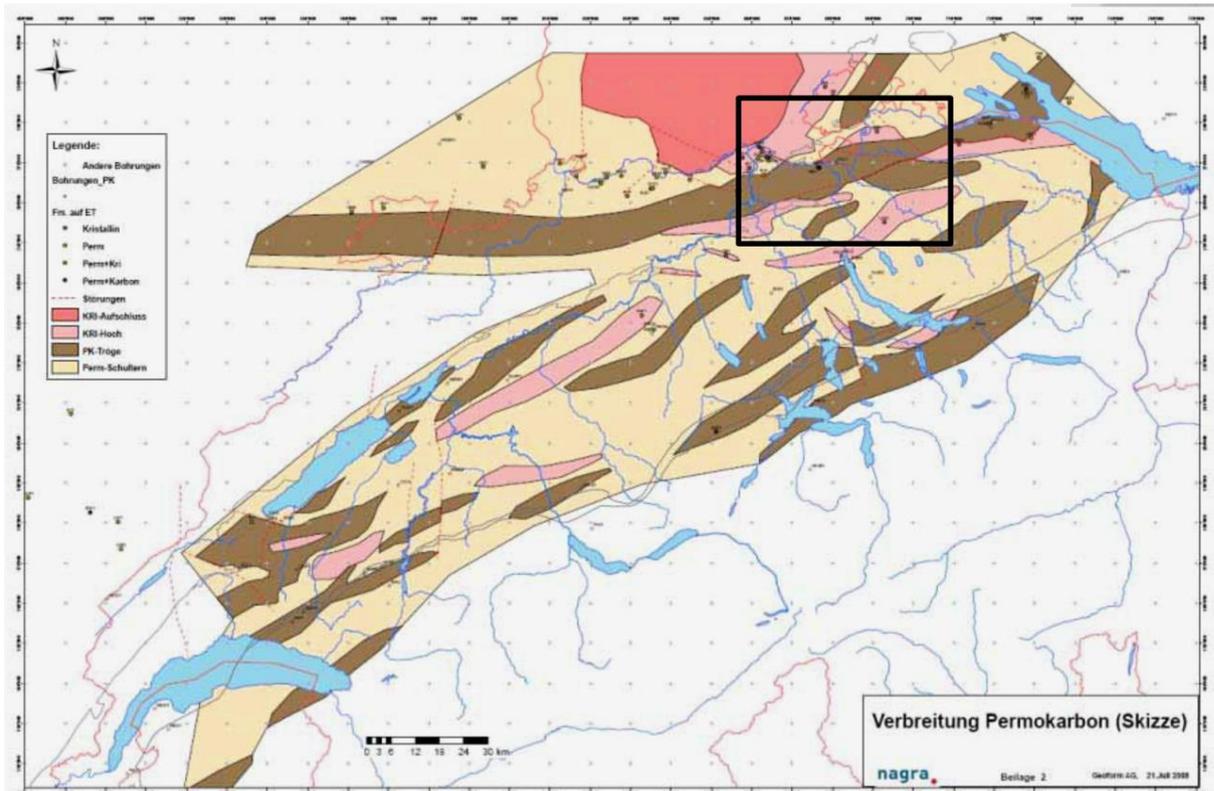


Abbildung 3: Angenommene Verteilung von Permokarbon-Trögen (braun), Permokarbon-Schulterbereiche (beige-gelb) und kristallinen Hochzonen (rosa) im Untergrund des Schweizer Mittellandes und nördlich angrenzenden Gebieten. An der Oberfläche aufgeschlossenes Kristallingestein im Schwarzwald (rot). Nicht publizierte Karte von W. Leu (2008).

Eine vielversprechendere Sequestrierungsoption für die Schweiz ist die Speicherung von superkritischem CO₂ in **salinen Aquiferen** im Schweizer Mittelland. Diese Option wurde im Rahmen eines BFE-Projektes (Diamond et al., 2010) im Detail untersucht. Die damit verbundene Potentialstudie (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 CO₂-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 CO₂-Sequestrierung aufweisen. Mindestens vier Sandstein- oder Karbonatreservoir 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 CO₂. 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 Potential dürfte deshalb tiefer ausfallen als ursprünglich von Chevalier et al. (2010) bestimmt.

Eine letzte Option für die geologische Sequestrierung von CO₂ im Untergrund ist die **in-situ Karbonatisierung** von Gesteinen reich an mafischen und ultramafischen Mineralien. Sowohl Diamond et al. (2010) als auch Leu & Siddiqi (2013) beurteilten das Potenzial für die in-situ Karbonatisierung in der Schweiz als gering. Die Gründe dafür waren, dass einerseits angenommen wurde, dass Umgebungstemperaturen von > 150°C erforderlich sind und diese Temperaturen in der Schweiz erst in grossen Tiefen (ab ca. 5 km) zu erwarten sind und dass andererseits solche Gesteine in der Schweiz nur in relativ kleinen Mengen und ausschliesslich in den Alpen vorkommen, wo sie aufgrund der alpinen Metamorphose ihre Porenräume und Durchlässigkeiten für CO₂ in der Gesteinsmatrix verloren haben. Dafür sind sie oft von Trennflächen durchzogen, die Wegsamkeiten für ein Fluid darstellen können. Diese Fliessnetzwerke sind aber nur selten gegen oben durch undurchlässige Schichten abgedichtet und eignen sich somit nur bedingt für die sichere Sequestrierung von CO₂. Zudem ist in einem reinen Trennflächennetzwerk mit vernachlässigbarer Matrixpermeabilität die reaktive Oberfläche des Gesteins (d.h. die mit dem Fluid in direktem Kontakt stehenden Mineralien) relativ gering. In einem solchen System würde die Karbonatisierung viel weniger effizient ablaufen. Entsprechend wurde in der Schweiz die in-situ Karbonatisierung in der Folge nicht weiter verfolgt. Zwischenzeitlich evaluierte Pilotprojekte mit in-situ Karbonatisierung zeigen jedoch, dass die Karbonatisierung schneller und bereits bei tieferen Temperaturen (bereits ab 50°C) ablaufen können als angenommen.

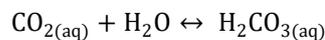


3 CO₂-Mineralisation

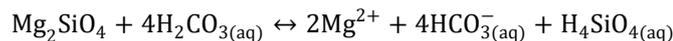
3.1 Prinzip

Das grundlegende Prinzip der CO₂-Mineralisation oder Karbonatisierung (in-situ, oberflächlich oder ex-situ) beschreibt die Bildung von Karbonatmineralien aus CO₂, Wasser und bivalenten Kationen (z.B. Ca²⁺), 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:

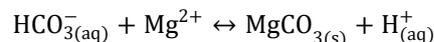
- Schritt 1 – Das gasförmige CO₂ (CO_{2(g)}) löst sich in Wasser (CO_{2(aq)}) und bildet mit Kohlensäure folgendes Gleichgewicht:



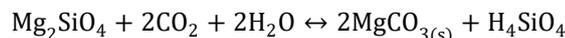
- Schritt 2 – Die im Reservoir vorhandenen Silikatmineralien – hier als Beispiel Mg-Olivin - werden durch die Kohlesäure aufgelöst und setzten bivalente Kationen frei. Dies wird durch eine Erniedrigung des pH - verursacht durch die Lösung von CO₂ im Formationswasser - begünstigt:



- Schritt 3 – Die Kationen verbinden sich mit den in Lösung vorhandenen Bikarbonat-Ionen (HCO₃⁻) und fallen als feste Karbonatmineralien - in diesem Beispiel Magnesit (MgCO₃) - aus.



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



Das Nebenprodukt H₄SiO₄ ist unbedenklich und fällt normalerweise als amorphes Gel aus, das mit der Zeit zu Quarz (SiO₂) dehydriert. Analog zum Beispiel des Mg-Olivins können theoretisch alle Mineralien karbonatisieren, welche bivalente Kationen enthalten (aber kein CO₂). Die häufigsten Kationen sind dabei Ca, Mg und Fe, welche die Karbonatmineralien Kalzit (CaCO₃), Magnesit (MgCO₃), Dolomit (CaMg(CO₃)₂) und Siderit (FeCO₃) bilden. Unter gewissen Bedingungen (d.h. T < 65 °C), bilden sich stattdessen hydratisierte Karbonate wie z.B. Hydromagnesit (Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·4H₂O) oder Nesquehonit (MgCO₃·3H₂O). 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 CO₂ (alle Angaben auf Molbasis, nicht auf Gewichtsbasis) die am besten geeigneten Ausgangsstoffe für die Karbonatisierung sind. Optimale Gesteine sind also durch

$$\text{Mol}(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}) - \text{Mol}(\text{CO}_2) \gg 1$$

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).



3.2 Methoden und Technologiereife

Bei der CO₂-Mineralisierung (= Karbonatisierung) werden verschiedene Methoden unterschieden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Methoden der CO₂-Karbonatisierung (Kelemen et al., 2019; NASEM, 2019, Hovorka et al., 2021)

Methoden	Verfahren
Ex-situ	Der Abbau, die Zerkleinerung und der Transport von reaktiven 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.
Oberflächlich (surficial)	Das CO ₂ in der Luft wird bei Oberflächenbedingungen mit reaktiven Mineralien zur Karbonatisierung gebracht (z.B. Abraum, Ausbruchmaterial, Schlacke). Dieser Prozess lässt sich beschleunigen, wenn die reaktiven Mineralien mit einem an CO ₂ angereichertem Gas besprüht werden.
In-situ	Ein CO ₂ -führendes Fluid wird mit Hilfe von Bohrungen durch ein Gestein mit reaktiven Mineralien im Untergrund zirkuliert.

3.2.1 Ex-situ Karbonatisierung

Bei der ex-situ Karbonatisierung steht nach wie vor die Forschung und Entwicklung im Labormassstab im Fokus. In jüngerer Zeit findet eine Weiterentwicklung der Technologie statt mit dem Ziel, sowohl CO₂-Emissionen zu reduzieren als auch neu, hochwertige Produkte aus Karbonat (Beton, Plastik) herzustellen. Damit würden sich die im Vergleich zur in-situ Karbonatisierung signifikant höher eingeschätzten Kosten relativieren (Kelemen et al., 2019; NASEM, 2019, Hovorka et al., 2021). In der Schweiz treiben beispielsweise die EMPA zusammen mit der ETH Zürich die Technologie voran (Winnefeld et al., 2022). Die Firma Neustark AG in Bern (www.neustark.com) ist ein Anbieter im Bereich von Carbon Removal (CDR) und entwickelt Lösungen zur dauerhaften Speicherung von biogenem CO₂ in recycelten mineralischen Abfällen wie Abbruchbeton. Zurzeit sind 11 Anlagen in Betrieb. Dabei wurden bisher 408 Tonnen CO₂ entfernt (netto).

3.2.2 Oberflächige Karbonatisierung

Die oberflächige Karbonatisierung steht ebenfalls im Fokus von Forschung und Entwicklung. Der Vorteil gegenüber der ex-situ Karbonatisierung liegt darin, dass die oberflächige Karbonatisierung ohne verfahrenstechnische Anlagen auskommt und deshalb kostengünstiger als die ex-situ Karbonatisierung sein dürfte (Kelemen et al., 2019; NASEM, 2019, Hovorka et al., 2021). Obwohl die oberflächige Karbonatisierung im Vergleich zu den anderen Methoden langsamer abläuft, führt beispielsweise die «De Beers Group of Companies» in einigen ihrer Minen in Südafrika Pilotversuche durch mit dem Ziel, in den kommenden Jahren einige ihrer Minen CO₂-neutral zu machen (Mervine et al., 2018).

3.2.3 In-situ Karbonatisierung

Von den drei genannten Methoden ist die in-situ Karbonatisierung technologisch am weitesten fortgeschritten und wird am kostengünstigsten eingeschätzt (Kelemen et al., 2019; NASEM, 2019, Hovorka et al., 2021). Damit die Karbonatisierung in-situ (d.h. unter der Erdoberfläche, in einem Reservoir) ablaufen kann, müssen drei geologische Vorbedingungen erfüllt sein:

- Poröse und/oder permeable Gesteine reich an bivalenten Ca-, Mg- und Fe-Kationen, in welche das CO₂-reiche Fluid hineingepresst werden kann und die reaktiven Mineralien erreicht. Daneben muss Platz für das Wachstum von Karbonatmineralien vorhanden sein, da diese ein grösseres Molvolumen haben als die aufgelösten Silikatmineralien.
- Erhöhte Reservoirtemperatur, damit die Reaktion möglichst schnell ablaufen kann.



- Formationswasser als Katalysator (Diamond et al., 2010).

In Bezug auf das Endprodukt ist die in-situ Karbonatisierung prinzipiell mit der Sequestrierung von CO₂ in salinen Aquiferen vergleichbar (Abbildung 2, Kapitel 2). Im Unterschied zu der CO₂-Karbonatisierung in salinen Aquiferen (typischerweise aus Dolomit, Kalkstein oder Sandstein), findet die in-situ Karbonatisierung in (ultra-)mafischen (z.B. basaltischen) Gesteinen statt. In glasreiche Basalten verläuft die CO₂-Karbonatisierung um Faktoren schneller ab (Abbildung 4). Deshalb ist die in-situ Methode weniger vom Vorhandensein und der Integrität einer abdichtenden Schicht («caprock») über dem Reservoir abhängig als dies bei salinen Aquiferen resp. erschöpften Gas- und Ölfeldern der Fall ist. Damit wird die Gefahr eines unerwünschten Entweichens von CO₂ kleiner. Die aus der Lösung von Silikatmineralien gebildeten Karbonatmineralien sind über geologische Zeiträume stabil und verbleiben an Ort und Stelle, so dass das CO₂ langfristig und sicher sequestriert ist.

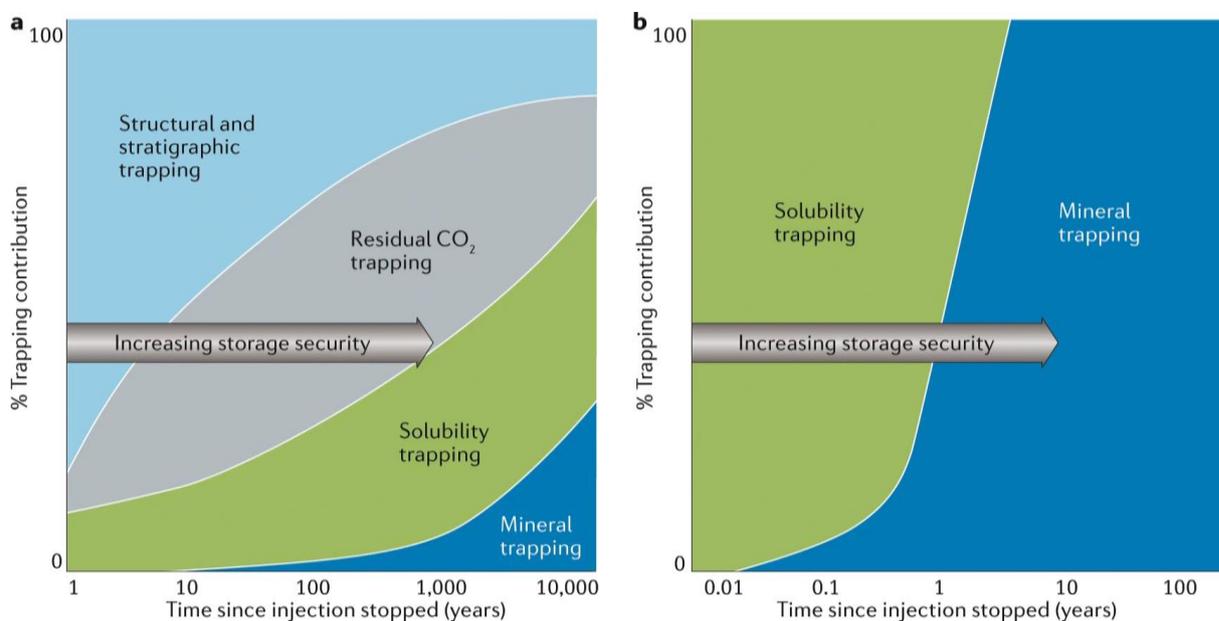


Abbildung 4: Speichermechanismen für CO₂ in salinen Aquiferen (links) verglichen mit in-situ Karbonatisierung in nicht metamorphen, glasigen Basalten (rechts). Bei beiden Speicheroptionen spielt die Bildung von Karbonatmineralien eine wichtige Rolle für die langfristige Speichersicherheit. Bei der in-situ Karbonatisierung findet dieser Prozess jedoch bereits ab wenigen Wochen nach der Injektion statt und nicht erst nach hunderten bis tausenden von Jahren (aus Snæbjörnsdóttir et al., 2020).

CarbFix (Island)

Das erfolgreichste Pilotprojekt in Bezug auf in-situ Karbonatisierung ist das Projekt CarbFix in Island (Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Ungefähr 25 km westlich von Reykjavik, nahe des Geothermiekraftwerks Hellisheiði, wird seit über zehn Jahren CO₂ in ein poröses, nicht metamorphes basaltisches Reservoir gepumpt und mineralisiert (Abbildung 5). In der ersten Phase des Projektes (2012 bis 2016) wurden 230 t in Süßwasser gelöstes CO₂ sowie eine CO₂-H₂S-Mischung in einer Tiefe von 400 bis 800 m (20 bis 50 °C) injiziert. Die Daten aus der Überwachung zeigten, dass über 95 % der injizierten Gase innerhalb von zwei Jahren mineralisiert wurden. Dabei wurde keine Reduktion in der Durchlässigkeit des Reservoirs beobachtet. Aufgrund des Erfolges der Pilotphase wird seit 2014, in einem tieferen (800+ m) und heisseren (250 °C) Bereich des Reservoirs CO₂ im grossen Massstab (ca. 12'000 t CO₂ pro Jahr) sequestriert. Dabei findet die Umwandlung von > 50 % des CO₂ zu Karbonatmineralien innerhalb von einigen Monaten statt. Auch in diesem Reservoir wurde bis anhin keine Verringerung der Injektivität beobachtet, da die Karbonatisierung erst in einer gewissen Distanz vom Injektionspunkt stattfindet,



nachdem die Auflösung von Silikatmineralien den pH-Wert so weit erhöht hat, dass Karbonatminerale überhaupt ausfallen können.



Abbildung 5: Bohrkerne aus dem CarbFix Reservoir, welche die poröse basaltische Reservoirmatrix (grau) zeigen und die neu gebildeten Karbonatminerale (= das gespeicherte CO₂) in Weiss (www.carbfix.com).

Wallula (USA)

Ein weiteres Pilotprojekt ist das Wallula-Projekt im Bundesstaat Washington (USA; White et al., 2020). Im Unterschied zu CarbFix wurde hier nicht gelöstes CO₂ sondern ca. 1'000 t reines, superkritisches CO₂ in nicht metamorphe, glasige Basalte in einer Tiefe von 800 bis 900 m (Temperatur ca. 35 °C) injiziert. Es zeigte sich, dass zumindest zu Beginn, ein Teil des CO₂ als freie Phase vorlag und nur durch undurchlässige Schichten innerhalb der Basaltsequenz am Entweichen gehindert wurde. Nach zwei Jahren waren ca. 60% des CO₂ mineralisiert. Die Überwachung an der Oberfläche über Jahre nach der Injektion hat gezeigt, dass kaum CO₂ aus dem Reservoir entwichen ist und die Speicherung ebenfalls erfolgreich verlaufen ist.

Beide Projekte zeigen, dass die Karbonatisierung schneller und bereits bei tieferen Temperaturen ablaufen kann als ursprünglich angenommen – auch wenn die Reaktionsraten und somit die Menge CO₂, die pro Zeiteinheit sequestriert werden kann, geringer sind als bei höheren Temperaturen.



4 Screening von Vorkommen in der Schweiz

4.1 Genereller Workflow

Der für diese Studie entwickelte Workflow zum Screening von geeigneten Gesteinsvorkommen für CO₂-Mineralisierung in der Schweiz umfasst folgenden Ablauf:

- Identifikation von generell reaktiven Mineralien anhand einer allgemeinen Literaturrecherche.
- Ableitung von potenziell reaktiven Gesteinen anhand einer Lithologie-spezifischen Literaturrecherche.
- Verortung / Screening der potenziellen Wirtgesteinsvorkommen (= geologische Einheiten) in der Schweiz.
- Geochemische Überprüfung mittels in der Literatur publizierten chemischen Gesteinszusammensetzungen von ausgewählten spezifischen Gesteinsformationen.
- Dokumentation der räumlichen Verteilung der potenziell reaktiven geologischen Einheiten.

4.2 Reaktive Mineralien

4.2.1 Methodik

Anhand der in Kapitel 3.1 ausgeführten Prinzipien der CO₂-Mineralisierung wurden folgende Kriterien zur Bestimmung reaktiver Mineralien festgelegt:

- Sie enthalten Ca, Mg und/oder Fe. Weitere bivalente Kationen wurden nicht in Betracht gezogen.
- Sie treten gesteinsbildend auf, d.h. sie stellen einen wesentlichen Anteil (> 5 Gew.-%) im Gesteinsverbund dar. Seltene Mineralien, die nur an vereinzelt Standorten vorkommen, wurden nicht in die Kompilation miteinbezogen.

Folgende Mineralgruppen wurden ausgeschlossen, obwohl sie die oben genannten Kriterien, zumindest teilweise, erfüllen würden:

- Karbonatminerale (d.h. Kalzit, Dolomit, Ankerit, Magnesit, Siderit und deren Mischkristalle), die durch natürliche sedimentäre oder hydrothermale Prozesse (= ohne Karbonatisierung durch injiziertes CO₂) entstanden sind. Ein Anteil dieser Mineralien wird bei Kontakt mit einem später injiziertem CO₂-haltigen Fluid aufgrund des niedrigen pH aufgelöst. Dabei werden zwar bivalente Kationen frei, gleichzeitig wird aber auch das natürlicherweise in diesen Mineralien enthaltene CO₂ frei, so dass insgesamt kein zusätzliches CO₂ sequestriert wird. Da die Lösungsraten von Karbonaten generell höher sind als die von Silikatmineralien, wird der pH neutralisiert, ohne dass Kationen (Ca, Mg oder Fe) aus Silikaten freigesetzt werden. Gesteine mit erhöhtem Karbonatanteil (> 5 Gew.-%) sollten deshalb nicht in Betracht gezogen werden.
- Sulfatminerale (d.h. Gips und Anhydrit): Während der Auflösung dieser Mineralien werden SO₄-Ionen frei, die sich zu Schwefelwasserstoff (H₂S) umgewandelt werden können. H₂S ist sowohl toxisch als auch stark korrosiv und deshalb in diesem Kontext unerwünscht. Zudem sind Sulfatminerale vor allem in evaporitischen Formationen anzutreffen, welche generell durch sehr tiefe Durchlässigkeiten charakterisiert sind oder in karbonatreichen Gesteinen (z.B. Dolomiten), welche bereits als Reservoir für die Karbonatisierung ausgeschlossen wurden.
- Sulfidminerale (z.B. Pyrit oder Markasit): Wie auch bei den Sulfatmineralien wird hier bei der Auflösung H₂S gebildet. Zudem enthalten Gesteine mit hohem Anteil an Sulfidmineralien oft



hohe Konzentrationen an Schwermetallen (z.B. Arsen) die während der Minerallösung freigesetzt werden. Sulfidminerale kommen in den meisten Gesteinen in Konzentrationen von wenigen Gew.-% vor. In diesen geringen Konzentrationen sind weder die Bildung von H_2S noch das Freisetzen von Schwermetallen ein Problem.

- Extrem stabile Silikatminerale (z.B. Granat): Solche Minerale lösen sich kaum in Kontakt mit Wasser. Auch bei Anteilen von > 5 Gew.-% tragen sie deshalb oft nur einen vernachlässigbaren Anteil an freiwerdenden Kationen bei. Zudem sind solche Minerale primär in metamorphen Gesteinen zu finden. Diese Gesteine zeigen aufgrund ihrer geologischen Geschichte oft nur sehr geringe Porositäten und/oder Permeabilitäten.

4.2.2 Resultat

Basierend auf den im vorgängigen Kapitel definierten Kriterien sowie Literaturangaben (z.B. Hills et al., 2020; Trommsdorff et al., 1999) wurde die Tabelle 2 mit Mineralien erstellt, die theoretisch karbonatisiert werden können. In der Tabelle 2 mitberücksichtigt sind die Mol CO_2 , die pro Mol gelöstem Mineral sequestriert werden können. Dies ist ein theoretisches Maximalverhältnis, welches von kompletter Auflösung des Minerals ausgeht. Die tatsächliche Auflösung hängt von den Löslichkeiten, den Lösungsraten und der reaktiven Oberfläche der Mineralien ab. In der vorliegenden Studie wurden dazu keine Daten kompiliert, da diese Eigenschaften stark abhängig von der Fluidzusammensetzung (z.B. pH und Salinität), der Reservoirtemperatur und dem Trennflächengefüge im Gestein sind. Sie sollten deshalb für bestimmte Gesteine und Regionen im Rahmen einer weiterführenden Detailstudie individuell untersucht werden.

4.3 Potenzielle Wirtgesteine

4.3.1 Methodik

Die identifizierten Mineralien wurden in der Schweiz vorkommenden Gesteinen zugeordnet (Tabelle 2). Bei Gesteinen mit geringen Konzentrationen an Ca, Mg und Fe, können nur geringe Mengen an CO_2 gespeichert werden. Als untere Grenze wurde ein Kriterium $CaO + MgO + FeO_{(tot)} > 15$ Gew.-% in der weiteren Bearbeitung eingeführt und in erster Annäherung mit Hilfe von Literatur (Meyer, 2022; Trommsdorff et al., 1999) angegebenen modalen Mineralbestands für Gesteine in der Schweiz angewendet.

4.3.2 Resultat

Magmatische und metamorphe Wirtgesteine

Zu den Wirtgesteinen zählen intermediäre (Andesit / Diorit; Tonalit), mafische (Basalt / Gabbro) und ultramafische Magmatite (Peridotit) sowie deren metamorphen Äquivalente (Grünschiefer, Metagabbro, Amphibolit, Serpentin). Zu den ausgeschlossenen Gesteinen gehören felsische und saure magmatische Gesteine (Granit / Granodiorit, Syenit, Rhyolith und Trachyt); die damit assoziierten metamorphen Gesteine (Orthogneis) und die meisten Metasedimente (Paragneis).

Sedimentäre Wirtgesteine

Da Kalk- und Dolomitgesteine sowie sulfatreiche Evaporite ausgeschlossen wurden (siehe Kapitel 4.2.1), liegt der Fokus auf klastischen Sedimenten. Bei der Beurteilung sollte jedoch jede identifizierte Gesteinseinheit einzeln bewertet werden, da die chemische Zusammensetzung klastischer Formationen von der Herkunft des Materials, vom Transport des Materials und vom Ausmass der Infiltration von externen Formationswässern während der Diagenese abhängt. Besteht das sedimentäre Liefergebiet aus Gesteinen mit geringen $CaO + MgO + FeO_{(tot)}$ -Gehalten, so fehlen diese Elemente auch in den entstehenden Sedimenten. Dies ist der Fall bei klastischen Sedimenten aus Liefergebieten, in denen beispielsweise felsische magmatische Gesteine oder ihre metamorphen Äquivalente vorherrschen. Aber auch wenn das Liefergebiet durch einen hohen Gehalt an reaktiven Mineralien



gekennzeichnet ist, können die daraus resultierenden Sedimente geringe $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}_{(\text{tot})}$ -Gehalte aufweisen, weil mafische Mineralien (die reich an Mg und Fe sind) besonders anfällig für chemische Verwitterung sind. Ähnlich verhält es sich mit Sedimenten, die durch intensive Veränderungen nach der Ablagerung (z. B. Pedogenese, saure Auslaugung) beeinträchtigt wurden.

Für das Screening wurden der Taveyannaz-Sandstein und die Glaukonit-Sandsteine der Garschella-Formation als potenzielles sedimentäres Wirtgestein weiterverfolgt. Die anderen identifizierten Sedimentgesteine (Eisenoolith, Hämatitischer Sandstein, Arkosesandstein) kommen als Wirtgestein ebenfalls in Frage, sie wurden im Screening jedoch nicht weiter berücksichtigt, weil in der geprüften Literatur keine robusten Angaben zum modalen Mineralbestand gefunden werden konnte.



Tabelle 2: Liste der reaktiven Mineralien und potenziell reaktiven Wirtgesteine.

Mineralgruppe	Mineral Name	Chemische Zusammensetzung	Sedimentgesteine	Magmatische Gesteine	Metamorphe Gesteine	Mol CO ₂ gebunden pro mol Mineral (gelöst)
Amphibol	Aktinolith	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Taveyannaz-Sandstein	Tonalit	Amphibolit	7
	Anthophyllit	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		Andesit / Diorit	Metabasika	7
	Glaukophan	$\text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		Gabbro / Basalt	Metabasalt	3
	Hornblende	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		Hornblendit	Metagabbro	7
	Pargasit	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Al}(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		Lherzolith	Blauschiefer	6
	Tremolit	$\text{Ca}_2(\text{Mg}_{5.0-4.5}\text{Fe}^{2+}_{0.0-0.5})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$			Metakarbonate	7
Biotit	Annit	$\text{KFe}^{2+}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		Andesit / Diorit		3
	Phlogopit	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		Tonalit		3
Chlorit	Chamosit	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Taveyannaz-Sandstein		Grünschiefer	5
	Klinochlor	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$				5
Epidot	Klinozoisit	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$				2
	Epidot	$\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$			Metabasika	max. 5
Hydroxid	Goethit	Fe^{3+}OOH	Eisenoolith			1
	Limonit	Fe^{3+}OOH	Blegi Oolith			1
		Fe^{3+}OOH				
Schichtsilikate	Glaukonit	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Glaukonit-Sst. / Grünsandstein			max. 2
	Seladonit	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Garschella-Fm.			min. 1
Olivin	Fayalit	$\text{Fe}^{2+}_2\text{SiO}_4$		Peridotit		2
	Forsterit	Mg_2SiO_4		Dunit Pyroxenit Harzburgit Diallagperidotit		2
Oxide	Hämatit	Fe_2O_3	Hämatitischer Sandstein			2
	Magnetit	Fe_3O_4				3
Plagioklas	Anorthit	$\text{Ca}_{0.9-1}\text{Na}_{0.1-0}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Arkosesandstein	Dazit / Tonalit	Metabasika	1
	Bytownit	$\text{Ca}_{0.7-0.9}\text{Na}_{0.3-0.1}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$		Andesit / Diorit		
	Labradorit	$\text{Ca}_{0.5-0.7}\text{Na}_{0.5-0.3}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$		Gabbro /		
	Andesin	$\text{Ca}_{0.3-0.5}\text{Na}_{0.7-0.5}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$		Basalt		
	Oligoklas	$\text{Ca}_{0.1-0.3}\text{Na}_{0.9-0.7}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$				



Tabelle 2 (Fortsetzung): Liste der reaktiven Mineralien und potenziell reaktiven Wirtgesteine.

Mineralgruppe	Mineral Name	Chemische Zusammensetzung	Sedimentgesteine	Magmatische Gesteine	Metamorphe Gesteine	Mol CO ₂ gebunden pro mol Mineral (gelöst)
Pyroxen (CPx)	Augit	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆	Taveyannaz-Sandstein	Andesit / Diorit Gabbro / Basalt Pyroxenit Harzburgit Diallagperidotit	Granulit	max. 2
	Diopsid	CaMgSi ₂ O ₆				2
	Hedenbergit	Ca(Fe,Mg)Si ₂ O ₆				2
	Omphazit	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)Si ₂ O ₆				max. 2
	Pigeonit	CaMgSi ₂ O ₆				2
Pyroxen (OPx)	Enstatit	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆				2
	Ferrosilit	Fe ₂ ⁺² Si ₂ O ₆				2
Pyroxenoid	Wollastonit	CaSiO ₃			Skarn	1
Serpentin	Antigorit	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄			Serpentinit	3
	Chrysotil	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄				3
	Lizardit	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄				3
Tonmineral (Smektit)	Montmorillonit	(Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · nH ₂ O				max. 2.3
	Nontronit	Na _{0,3} Fe ³⁺ ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O				2
	Saponit	(Ca,Na) _{0,3} (Mg,Fe ₂₊) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · 4H ₂ O				max. 3.3
Zeolith	Heulandit	(Ca,Na,K) ₅ (Si ₂₇ Al ₉)O ₇₂ · 26H ₂ O			Metabasika	max. 5
	Laumontit	Ca ₄ Al ₈ Si ₁₆ O ₄₈ · 18H ₂ O				4
	Stilbit	NaCa ₄ Si ₂₇ Al ₉ O ₇₂ · 28H ₂ O				4
Andere	Brucit	Mg(OH) ₂				1
	Chloritoid	(Fe ²⁺ ,Mg,Mn) ₂ Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₄				2
	Prehnit	Ca ₂ Al(AlSi) ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Taveyannaz-Sandstein		Metabasika	2
	Pumpellyit	Ca ₂ MgAl ₂ (SiO ₄)(Si ₂ O ₇) · H ₂ O	Taveyannaz-Sandstein		Metabasika	3
	Staurolith	(Mg,Fe ²⁺) ₂ Al ₉ Si ₄ O ₂₃ (OH)			Metapelite	2
	Talk	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂			Talkschiefer	3
	Titanit/Sphen	CaTi(SiO ₄)O				1
	Zoisit	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)				2



4.4 Verortung / Screening von Wirtgesteinen in der Schweiz

4.4.1 Methodik

Datengrundlage

Zur Identifizierung und Verortung der potenziell reaktiven Wirtgesteine (erläutert in Kapitel 4.3.2) wurde der öffentlich zugängliche Vektordatensatz GeoKarten 500 (GK500) der Geologischen und Tektonischen Karte der Schweiz und des abgrenzenden Auslands im Massstab 1: 500'000 verwendet (vektorielle GIS-Version 1.3, 2014, www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/geology/maps/gk500/vector). Der Datensatz beinhaltet eine grossmassstäbliche geologische/ tektonische/ geotechnische und hydrogeologische Zuordnung der an der Oberfläche aufgeschlossenen Gesteine. Eine Beschreibung des relevanten Datensatz-Inhalts sowie der verwendeten Objekte (markiert in rot) kann der Abbildung 6 entnommen werden.

Um die Mächtigkeit sowie die Ausdehnung der Gesteinsvorkommen in die Tiefe zu illustrieren und abzuschätzen, wurden ausgewählte Profilschnitte aus dem Datensatz des Geologischen Atlas der Schweiz im Massstab 1:25'000 (Profile GA25; 2022; map.geo.admin.ch) und den Nord-Süd-Traversen (Nagra, 2008) genutzt. Die Auswahl der Profilschnitte erfolgte unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Wirtgesteine.

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Beschreibung	Name der Tabellen/Shapefile
Geotechnik				Zusammenfassung aller geologischen Vektordatensätze mit sämtlichen, für die Geotechnik wichtigen, Attribute	
	Gesteinsklasse			Polygonobjekte klassiert in Locker- und Festgesteine	PY_Basis_Flaechen (Attribut: GESTEINSKL)
	Lithologie			Polygonobjekte der lithologisch-petrographischen Bezeichnung der Gesteine	PY_Basis_Flaechen (Attribut: LITHO/ LITH_PET)
	Genese			Polygonobjekte des Entstehungs- bzw. Ablagerungsmilieus von Lockergesteinen	PY_Basis_Flaechen (Attribut: GENESE)
Geologie				Vektordatensatz zur Geologischen Karte der Schweiz 1:500'000. Gruppierung aller Unterebenen.	
	Punktuelle Phänomene			Punktobjekte der auf der gedruckten Karte dargestellten punktuellen Phänomene.	PT_Geologie
	Quartär Linien			Linienobjekte quartärer Herkunft (z.B. Moränenwälle).	LL_Quartear
	Tektonische Störungen			Linienobjekte von tektonischen Störungen (Brüche, Überschiebungen, Abschiebungen etc.). Es werden beobachtete (gesichert) und vermuteten (nicht gesichert) Störungen unterschieden.	LL_Tekto_Stoerung
	Geologische Formationen			Polygonobjekte der lithostratigraphisch unterscheidbaren geologischen Formationen.	PY_Basis_Flaechen (Attribut: GEOL_F)
Tektonik				Vektordatensatz zur Tektonischen Karte der Schweiz 1:500'000. Gruppierung aller Unterebenen.	
	Mineral-Lineation			Linienobjekte der Minerallineation in den Alpen.	LL_Minerallineation
	Strukturachsen			Linienobjekte der Spuren von Antiklinal- und Faltenachsen. Es werden gesichert und nicht gesichert Achsenspuren unterschieden.	LL_Strukturachsen
	Alpine Strukturen			Linienobjekte von tektonischen Störungen (Brüche, Überschiebungen, Abschiebungen etc.). Es werden	LL_Tekto_Stoerung
	Fels-Isohypsen			Isohypsen (Linienobjekte) Felsoberfläche des Molassebeckens (Tiefenangaben in Metern unter Terrainoberfläche).	LL_Isohypsen
	Metamorphose-Zonen			Linienobjekte der Isograden (Mineralzonen) der alpinen Metamorphose.	LL_Metamorph_Zonen
	Tektonische Einheiten			Polygonobjekte der tektonischen Einheiten.	PY_Basis_Flaechen (Attribut: T1-T2_ID)

Abbildung 6: Auszug aus der Kurzbeschreibung zum Vektordatensatz GeoKarten500 (GK500) Version 1.3 exklusiv des Hydrogeologie-Datenbeschriebes (modifiziert aus Swisstopo, 2014, www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/geology/maps/gk500/vector). Rot markiert sind die in diesem Projekt verwendeten Objekte.

Verarbeitung Datensatz

Der Vektordatensatz GK500 wird vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo als ESRI ArcMap Datei (mxd) bereitgestellt (vektorielle GIS-Version 1.3, 2014, www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/geology/maps/gk500/vector). Zur Verarbeitung und Darstellung



der GK500-Daten wurde das Open-Source-Geoinformationssystem QGIS verwendet¹. Um die in Kapitel 4.3.2 ausgewiesenen Wirtgesteinseinheiten in den GK500 Datensatz zu übersetzen, wurden die Attribute «LITHO», «GEOL_F» und «LITH_PET» (vgl. Abbildung 6) nach den in der Tabelle 3 aufgeführten Begriffen gefiltert. Sofern ein Polygon einen der aufgelisteten Begriffe (Tabelle 3) beinhaltet, wurde die Fläche als relevant eingestuft und als Grundlage weiterverwendet.

Tabelle 3: Ausgewählte Objekte der Attribute «LITHO», «GEOL_F» und «LITH_PET» des Datensatzes GK500.

«LITHO»	«LITH_PET»	«GEOL_F»
Andesit, Basalt	Glaukonitführender Quarzsandstein mit Echinodermenbruchstücken	Phonolithe
Basalte und Metabasalte	Serpentine	Olivin-Nephelinite
Phonolith	Peridotite und Olivinfelse	Tonalite, Diorite, Gabbros
Olivin-Nephelinit	Amphibolite mit Übergängen in Diorite und in hornblendeführende Gneise	Basaltische und metabasaltische Gesteine
Ultra-Basite	Grünschiefer mit Übergängen in basische Eruptivgesteine, Eklogite	Metagabbroide und eklogitische Gesteine
Tonalit, Diorit, Gabbro	Diorite und Gabbros	Meta-Ultrabasite (Serpentine, Talkschiefer; z.T. subkontinentaler Mantel)
Diorit, Gabbro		Andesite, Basalte
Amphibolit		Diorite, Gabbros
Meta-Ultrabasit, Metabasalt, Metagabbro		Ultrabasite
Metagabbro, Eklogit		Metagabbros, metabasalte (z.T. eklogitfaziell); Meta-Ultrabasite
Serpentin, Talkschiefer		Metaperidotite
Metaperidotit		Amphibolithe
		Nordhelvetischer Flysch (Matter Formation, Engi-Dachschiefer, Altdorfer Sandstein, Gres du Val d'Illiez, Gres de Taveyenne)

Daraufhin wurden mit QGIS-Werkzeugen die Geometrien der Flächen repariert² und auf die Schweizer Landesgebietsgrenze (exkl. Lichtenstein und aus-/ inländischer Exklaven) zugeschnitten.

Abgrenzung zu möglichen alternativen Datensätzen

Der GK500 Datensatz ist im Vergleich zum alternativen Vektordatensatz "GeoCover 1:25'000" (map.geo.admin.ch, Stand Juni 2023) erheblich einfacher strukturiert. Aufgrund seines kleineren Massstabs und seiner häufigen Überarbeitung wird dem GeoCover Datensatz grundsätzlich eine höhere Genauigkeit bei der geographischen Positionsbestimmung zugesprochen (vgl. Abbildung 7). Ein bedeutender Vorteil des GK500 Datensatzes ist jedoch die bereits schweizweit kohärente Einteilung der geologischen Einheiten (im GeoCover ist die Zuordnung auf das jeweilige zugrundeliegende Kartenblatt beschränkt und kann unter Umständen in einem anderen Kartenblatt z.B. einen anderen lokalen Namen tragen). Die Verwendung von dem zwar detaillierteren aber nicht kohärent zusammenhängenden GeoCover Datensatz wurde somit als zu interpretationsintensiv beurteilt und

¹ Die Umrechnung in ein QGIS-kompatibles Dateiformat erfolgte mit der «Mapqonverter Toolbox» (<https://github.com/WhereGroup/mapqonverter>, Aufgerufen am 05.12.2022).

² Geometrie-Reparatur: Entfernen von doppelten Knotenpunkten, polygoninternen Ringen und Korrektur von überlappenden Polygonen.



entspricht nicht der mit dieser Studie verfolgten Flughöhe. Zusätzlich ermöglicht die Zuordnung der Einheiten zur grundlegenden tektonischen Ebene den Ausschluss der quartären Bedeckung, was ein weiterer wesentlicher Vorteil für die Potenzialabschätzung darstellt.

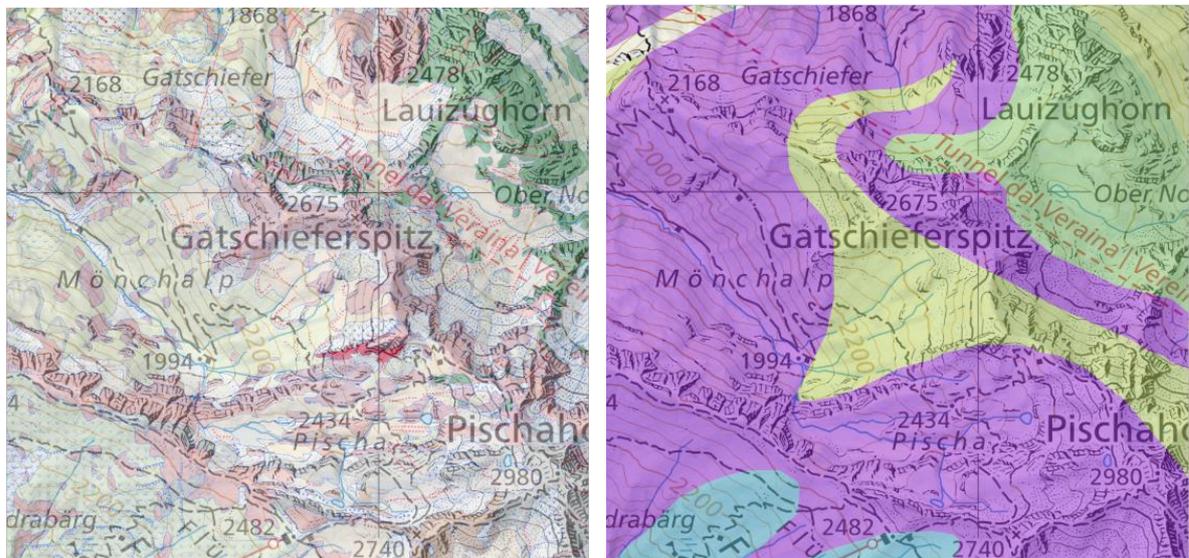


Abbildung 7: Identische Ausschnitte aus dem GeoCover (links) sowie dem GK500 Ebene Geotechnik – Lithologie (rechts) (nicht massstäblich, Farbcodierung irrelevant).

4.4.2 Resultat

Die Verortung von potenziellen Wirtgesteinen in der Schweiz basiert derzeit auf dem Datensatz GK500 im Massstab 1:500'000 (vgl. Kapitel 4.4.1). Massstabsbedingt ist damit eine gewisse Unschärfe in Bezug auf die tatsächliche Lage und auf den tatsächlichen Flächeninhalt verbunden. Ebenfalls mit einer Unschärfe behaftet sind die als Wirtgesteine ausgeschiedenen Flächen. Diese Flächen stellen geologisch-tektonische Einheiten mit potenziellen Wirtgesteinen dar, aber eben auch damit vergesellschaftete Gesteine, die nicht als Wirtgesteine agieren. Als Beispiel sei hier die geologisch-tektonische Einheit «Nordhelvetischer Flysch» genannt, welcher als Wirtgestein die Taveyannaz-Sandsteine beinhaltet, aber auch nicht reaktive Ablagerungen der Elm- und Matt-Formation. Somit wird die als Taveyannaz-Sandstein ausgeschiedene Fläche überschätzt. Eine weitere Unschärfe ergibt sich aus dem Umstand, dass beim Screening nur geologisch-tektonische Einheiten ausgeschieden werden konnten, die an der Oberfläche aufgeschlossen sind. Solche die sich im Untergrund befinden (ohne Ausbiss an der Felsoberfläche resp. unter der quartären Lockergesteinsbedeckung) wurden beim Screening nicht berücksichtigt und können entsprechend nicht weiter beurteilt werden. Als Beispiel sei hier auf die Permokarbon-Tröge verwiesen, in denen neben Kohleflözen zum Teil auch Arkosesandsteine vorkommen können, die als potenzielle Wirtgesteine durchaus infrage kommen könnten.

Generelle Übersicht (Anhang 1 inkl. Profilschnitte)

Die Übersichtskarte ist das synoptische Resultat des durchgeführten Screenings. Dargestellt sind potenzielle sedimentäre, magmatische (vulkanische und plutonische) sowie metamorphe Wirtgesteinvorkommen. Ebenfalls dargestellt sind die bestehenden Zementwerke- sowie KVA-Standorte (grösste CO₂-Punktemittenten) sowie Steinbrüche in potenziellen Wirtgesteinen (Tabelle 4). Die drei Traversen (West, Zentral, Ost) dienen der Illustration des generellen geologisch-tektonischen Aufbaus der Schweiz (Profilschnitte Westtraverse, Zentraltraverse und Osttraverse)



Tabelle 4: Schweizer Steinbrüche in potenziellen Wirtgesteinen.

Name	Typ	Status
Zernez - La Serra	Amphibolitgneis	in Betrieb
Zernez-Crastatscha	Amphibolitgneis	in Betrieb
Felsberg	Metabasalt	in Betrieb
Poschiavo (Selva)	Serpentinit	in Betrieb
Disentis Patschadauns	Serpentinit	stillgelegt
Mompé-Medel	Serpentinit	in Betrieb
Calmut, Oberalppass	Serpentinit	in Betrieb
Hospental	Serpentinit	in Betrieb
Ulrichen	Talkschiefer	stillgelegt
Campascio (Zalende)	Gabbro	in Betrieb
Evolène	Metabasalt	in Betrieb

Plutonische Wirtgesteinsvorkommen (Anhang 2 inkl. Profilschnitte)

Die plutonischen Wirtgesteinsvorkommen liegen mehrheitlich im Südosten der Schweiz und nehmen insgesamt eine Fläche von rund 67 km² ein. Ein Vorkommen liegt nördlich der Iorio-Tonale-Line (in Stucki et al., 2003 als Bellinzona-Dascio Zone bezeichnet) östlich von Giubiasco. Nördlich der Iorio-Tonale-Line sind die Gesteine sehr heterogen aufgebaut und es treten neben Tonaliten auch metamorphe Gesteinskörper aus Peridotit, Serpentin und Amphibolit auf. Der Tiefgang dieser Körper ist im Detail unbekannt, aber aufgrund der geologischen Profilschnitte ist von einigen hundert Metern auszugehen.

Ein weiteres, regional zerstreutes Vorkommen wird mit Dioritmassen und Gabbros der Berninadecke, Campo-Decke und dem Err-Deckenkomplex in Verbindung gebracht. Diese Körper dürften ebenfalls einen minimalen Tiefgang im hundert Meter-Bereich erreichen.

Vulkanische Wirtgesteinsvorkommen (Anhang 3 inkl. Profilschnitte)

Die vulkanischen Wirtgesteinsvorkommen beschränken sich auf ein sehr kleines Vorkommen im Norden des Kantons Schaffhausens (ca. 0.12 km²) und ein grösseres Vorkommen im Süden der Schweiz (rund 19 km²). Das nördliche Vorkommen ist mit dem Hegau-Vulkanismus assoziiert und umfasst ein kleines Gebiet mit Olivin-Nephelinit. Das südliche Vorkommen umfasst die Vulkanite bei Lugano mit andesitischen Wirtgesteinen, die einen Tiefgang von mehreren hundert Metern aufweisen.

Metamorphe Wirtgesteinsvorkommen (Anhang 4 inkl. Profilschnitte)

Die metamorphen Wirtgesteinsvorkommen kommen am häufigsten und über den ganzen Alpenbogen der Schweiz verteilt vor. Insgesamt nehmen sie eine Fläche von rund 659 km² ein. Sie kommen im Aar- und Gotthardmassiv vor, und im Wallis werden sie mit der Antrona-Zone, der Zone von Zermatt-Saas Fee und der Tsaté-Decke in Verbindung gebracht. Im Tessin sind sie mit der Ivrea-Zone und der Strona-Ceneri-Zone assoziiert. In Graubünden sind sie Bestandteile der Silvretta-Decke, der Arosler-Zone und der Platta-Decke. Die Vorkommen spannen, verursacht durch die unterschiedliche geologisch-tektonische Vorgeschichte, unterschiedlichste Geometrien und Formen auf: Von schmalen, steilstehenden und tiefreichenden Einheiten bis flächig-massig auftretenden, flachliegende Einheiten.



Sedimentäre Wirtgesteinsvorkommen (Anhang 5 inkl. Profilschnitte)

Das Screening der sedimentären Wirtgesteinsvorkommen umfasst die glaukonitführenden Quarzsandsteine der Garschella-Formation sowie die Taveyannaz-Sandsteine im Nordhelvetischen Flysch. Insgesamt sind rund 450 km² sedimentäre Vorkommen an der Felsoberfläche aufgeschlossen. Gemäss Meyer (2022) ist die Garschella-Formation nur einige Zehnermeter (max. 100 m) mächtig und besteht neben glaukonitführenden Sandsteinen aus kalkigem Mergel, Tonschiefer und Knollenkalk. Da genaue Angaben zum quantitativen Mineralbestand im Rahmen dieser Studie nicht gefunden werden konnten, wird die Garschella-Formation als mögliches, aber mit Unsicherheiten behaftetes Vorkommen geführt.

Der Taveyannaz-Sandstein kommt als fein- bis mittelkörniger, grünlich schimmernder Sandstein an der Basis der nordhelvetischen Flyschserien vor. Er enthält viele (16 bis 93 %; Vuagnat, 1952) kleine andesitische Bruchstücke, die als reaktives Wirtgestein betrachtet werden. In den Alpen wurden die Taveyannaz-Sandsteine teils mehrfach verfaltet, so dass die Mächtigkeit hoch variabel ist und bis 800 m erreichen kann (Menkveld-Gfeller et al., 2016).

4.5 Geochemische Überprüfung

4.5.1 Methodik

Für die im Screening ausgeschiedenen Gesteinseinheiten wurde für ausgewählte Wirtgesteinsvorkommen eine eingehendere geochemische Überprüfung durchgeführt zwecks Bestätigung des Potenzials. Dafür wurden chemische Analysen aus der Literatur zusammengezogen. Es handelt es sich um Röntgenfluoreszenz (XRF) Analysen des Gesamtgesteins. Diese geben Auskunft über die chemische (Element-)Zusammensetzung einer Probe, d. h. darüber, welche Elemente in welchen Mengen vorhanden sind. Bei den Hauptelementen ist es üblich, die Gehalte als Oxide in Gewichtsprozent anzugeben, z.B. SiO₂ statt Si, CaO statt Ca oder Na₂O statt Na. Eisen wird generell als FeO* angegeben, da nicht immer zwischen Fe^{II} und Fe^{III} (resp. FeO und Fe₂O₃) unterschieden wird.

Ausgewählt wurden der Taveyannaz Sandstein aus dem Nordhelvetischen Flysch und verschiedene (ultra)mafische Gesteine aus dem Alpenraum. Die meisten dieser Gesteine sind nicht frische sedimentäre oder plutonische Gesteine, sondern wurden während der alpinen Orogenese metamorph überprägt (grünschiefer- bis eklogitfazial) und liegen nun als Meta-Gesteine (z.B. Metagabbro, Serpentin) vor. Die Ausnahme bilden die Gesteine der Ivrea-Zone des Südalpins. Bei diesen Gesteinen handelt es sich um nicht-metamorph überprägte Mantelgesteine (Plutonite) bei denen die magmatischen Mineralien (Olivin, Pyroxene) grösstenteils erhalten sind. Die verschiedenen Vorkommen zeigen unterschiedliche Alter (paläozoisch, ev. sogar archaisch, bis jurassisch), und gehören zu unterschiedlichen tektonischen Einheiten (Helvetikum, Penninikum, Süd- und Ostalpin).

4.5.2 Resultat

Die Resultate sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Bei der Kompilation der Analysedaten wurde festgestellt, dass nicht jede einzelne Gesteinsprobe das Kriterium $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}_{(\text{tot})} > 15 \text{ Gew.-%}$ erfüllt. Insgesamt wird das Kriterium beim Zusammenziehen der Daten allerdings bei allen ausgewählten Wirtgesteinsvorkommen erfüllt. Für die überprüften Wirtgesteine können folgende Feststellungen werden gemacht:

- Peridotit und das metamorphe Äquivalent Serpentin weisen den höchsten Anteil an reaktiven Mineralien auf (rund 50 Gew.-%).
- Bei den Metabasalten, Metagabbros, Gneissen und Amphiboliten variiert der Anteil zwischen rund 20 – 40 Gew.-%.
- Geringere Anteile an reaktiven Mineralien (rund 15 bis 20 Gew.-%) weisen der Taveyannaz-Sandstein, Metadiorite (Bernina-Decke) und Meta-Andesite (Luganer Vulkanit) auf.



Ein weiteres Resultat in der Tabelle ist die Angabe der theoretischen Speicherkapazität $t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$ (Tonne CO_2 , die pro Tonne Wirtgestein theoretisch gespeichert werden kann). Diese Speicherkapazität berechnet sich aus der Stöchiometrie der chemischen Reaktionsgleichung und dem Anteil von $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}^*$. Für die theoretische Speicherkapazität $t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$ können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Für Peridotit / Serpentin liegt die theoretische Speicherkapazität mit rund $0.5 t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$ am höchsten.
- Bei Metabasalt, Metagabbro, Gneiss und Amphibolit variiert die theoretische Speicherkapazität zwischen $0.2 - 0.4 t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$.
- Für Taveyannaz-Sandstein, Metadiorit und Metaandesit liegt die theoretische Speicherkapazität zwischen $0.1 - 0.2 t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$.



Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung (Hauptelemente) von Gesteinen die sich möglicherweise für die Karbonatisierung eignen. Die genannten Zahlen entsprechen dem berechneten Durchschnitt der gegebenen Anzahl von Proben und der entsprechenden Standardabweichung. Die durchschnittliche Anzahl Tonnen CO₂, die pro Tonne Gestein theoretisch sequestriert werden können, ist in der letzten Reihe ($t_{CO_2} / t_{Gestein}$) angegeben.

Geologische Zone	Helvetikum	Oberpenninikum						
	Nordhelv. Flysch	Platta-Decke			Malenco-Forno-Lizun-Decke			Zone von Bellinzona-Dascio
Formation	Taveyannaz Fm.				Fedozzer Metagabbro und Forno-Metabasalt			
Gesteinstyp	(Meta-)Sandstein	Metagabbro	Metadiorit	Metabasalt	Metagabbro	Metabasalt	Amphibolit	Metagabbro
Anz. Proben	22	11	2	10	17	3	10	8
Referenz	Rahn et al. (1995)	Desmurs et al. (2002)			Ulrich & Borsien (1996)			Stucki et al. (2003)
Chemische Zusammensetzung (Gew.%)								
SiO ₂	57.7 ± 2.4	46.5 ± 5.3	53.7 ± 1.4	48.1 ± 1.1	46.0 ± 5.7	43.7 ± 3.4	48.1 ± 1.3	40.5 ± 5.3
TiO ₂	0.7 ± 0.1	2.1 ± 2.2	0.7 ± 0.3	1.7 ± 0.4	2.1 ± 1.8	2.1 ± 0.2	1.8 ± 0.3	2.3 ± 2.1
Al ₂ O ₃	16.0 ± 1.4	14.8 ± 3.5	18.2 ± 0.6	16.3 ± 1.4	15.7 ± 3.6	16.3 ± 0.4	17.3 ± 1.2	14.6 ± 2.8
FeO*	6.9 ± 2.4	9.6 ± 6.0	5.6 ± 0.8	9.3 ± 1.3	11.4 ± 4.1	11.3 ± 0.7	8.6 ± 1.9	9.2 ± 4.5
MnO	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.0	0.8 ± 1.8	0.2 ± 0.1
MgO	3.0 ± 0.5	8.3 ± 2.1	3.2 ± 0.1	7.0 ± 1.7	8.0 ± 2.7	7.9 ± 1.6	6.6 ± 0.8	9.9 ± 2.0
CaO	5.6 ± 1.9	10.6 ± 1.6	10.7 ± 1.0	8.4 ± 2.4	10.6 ± 2.6	13.2 ± 2.1	11.2 ± 1.0	20.0 ± 5.9
Na ₂ O	4.1 ± 0.9	3.4 ± 1.0	5.8 ± 0.2	4.0 ± 1.0	2.3 ± 1.0	3.5 ± 1.0	3.6 ± 0.7	0.6 ± 0.8
K ₂ O	1.4 ± 0.7	0.5 ± 0.7	0.1 ± 0.1	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.3	0.3 ± 0.0	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.8
P ₂ O ₅	0.2 ± 0.0	0.5 ± 0.8	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.8	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.0 ± 0.0
LOI	4.2 ± 1.4	3.4 ± 0.8	1.8 ± 0.3	4.0 ± 1.3	1.9 ± 2.8	1.1 ± 0.8	1.0 ± 0.4	1.9 ± 0.5
Total	99.8 ± 0.4	99.7 ± 0.3	99.9 ± 0.0	99.7 ± 0.8	99.2 ± 1.1	99.6 ± 0.4	99.4 ± 0.9	99.5 ± 0.4
CaO+MgO+FeO	15.4 ± 3.1	28.4 ± 9.7	19.4 ± 1.9	24.7 ± 5.4	30.0 ± 9.4	32.3 ± 4.4	26.4 ± 3.8	39.1 ± 12.5
$t_{CO_2}/t_{Gestein}$	0.12	0.23	0.15	0.20	0.24	0.26	0.21	0.32



Tabelle 6 (Fortsetzung): Chemische Zusammensetzung (Hauptelemente) von Gesteinen die sich möglicherweise für die Karbonatisierung eignen. Die genannten Zahlen entsprechen dem berechneten Durchschnitt der gegebenen Anzahl von Proben und der entsprechenden Standardabweichung. Die durchschnittliche Anzahl Tonnen CO₂, die pro Tonne Gestein theoretisch sequestriert werden können, ist in der letzten Reihe (t_{CO2} / t_{Gestein}) angeben.

Geologische Zone	Unterpenninikum			Südalpin				
	Simano-Decke		Chiavenna Komplex	Ivrea-Zone			Amphibolit	Orobische Decke
Formation	Komplex von Lod.-Biasca	Komplex von Cima Gagnone		Komplex von Finero				Vulcaniti di Lugano
Gesteinstyp	Amphibolit	Serpentinit	Amphibolit	Gabbro	Peridotit	Peridotit	Meta-Andesit	
Anz. Proben	7	5	2	14	5	11		10
Referenz	Schaltegger et al. (2002)	Evans & Trommsdorff (1978)	Liati et al. (2003)	Lu et al. (1997)		Hartmann & Wedepohl (1993)	Sills & Tarney (1984)	Stille & Buletti (1987)
Chemische Zusammensetzung (Gew.%)								
SiO ₂	49.2 ± 2.5	44.2 ± 1.4	49.1 ± 0.0	45.4 ± 1.3	43.6 ± 3.5	44.0 ± 0.5	47.2 ± 0.9	57.6 ± 2.4
TiO ₂	1.8 ± 0.6	0.6 ± 0.6	1.5 ± 0.1	2.7 ± 0.8	0.1 ± 0.1	0.0 ± 0.0	1.6 ± 0.4	1.0 ± 0.1
Al ₂ O ₃	14.8 ± 0.7	7.1 ± 4.4	16.3 ± 0.3	14.2 ± 2.1	3.3 ± 1.8	1.2 ± 0.5	15.4 ± 1.4	17.3 ± 0.3
FeO*	12.6 ± 1.9	9.7 ± 2.3	9.8 ± 0.5	16.2 ± 2.9	7.7 ± 5.4	8.0 ± 0.2	12.4 ± 1.7	7.0 ± 0.7
MnO	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0
MgO	6.7 ± 0.9	29.1 ± 12.3	8.6 ± 0.2	7.7 ± 0.8	38.4 ± 5.6	44.0 ± 1.3	7.0 ± 1.5	4.6 ± 1.0
CaO	10.5 ± 0.7	7.6 ± 5.6	10.3 ± 0.6	11.4 ± 1.7	4.2 ± 3.4	1.3 ± 0.4	13.4 ± 2.2	7.0 ± 0.8
Na ₂ O	2.8 ± 0.5	0.2 ± 0.2	3.2 ± 0.2	1.7 ± 0.3	0.2 ± 0.2	0.1 ± 0.1	2.2 ± 0.9	2.6 ± 0.3
K ₂ O	0.5 ± 0.1	0.0 ± 0.1	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.1	0.7 ± 0.2	1.8 ± 0.5
P ₂ O ₅	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0
LOI	0.5 ± 0.2	1.1 ± 1.1	1.2 ± 0.3	n.a.	n.a.	0.5 ± 0.3	n.a.	1.5 ± 0.4
Total	100.1 ± 1.2	99.9 ± 0.4	100.4 ± 0.6	99.9 ± 0.0	97.7 ± 2.9	99.4 ± 0.3	100.2 ± 0.7	100.8 ± 0.2
CaO+MgO+FeO	29.8 ± 3.5	46.4 ± 20.1	28.6 ± 1.3	35.2 ± 5.5	50.3 ± 14.4	53.3 ± 1.9	32.8 ± 5.4	18.5 ± 2.5
t _{CO2} /t _{Gestein}	0.23	0.44	0.23	0.27	0.50	0.54	0.26	0.15



Tabelle 7 (Fortsetzung): Chemische Zusammensetzung (Hauptelemente) von Gesteinen die sich möglicherweise für die Karbonatisierung eignen. Die genannten Zahlen entsprechen dem berechneten Durchschnitt der gegebenen Anzahl von Proben und der entsprechenden Standardabweichung. Die durchschnittliche Anzahl Tonnen CO₂, die pro Tonne Gestein theoretisch sequestriert werden können, ist in der letzten Reihe ($t_{CO_2} / t_{Gestein}$) angegeben.

Geologische Zone	Ostalpin	
	Silvretta-Decke	
Formation	Older Orthogn.	Serpentinit
Gesteinstyp	Gneiss	
Anz. Proben	4	10
Referenz	Schaltegger et al. (1997)	Melcher et al. (2002)
Chemische Zusammensetzung (Gew.%)		
SiO ₂	50.7 ± 1.7	40.4 ± 1.9
TiO ₂	1.7 ± 0.4	0.1 ± 0.1
Al ₂ O ₃	16.9 ± 1.9	2.6 ± 1.0
FeO*	9.8 ± 2.0	9.2 ± 2.0
MnO	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0
MgO	6.3 ± 0.6	36.9 ± 4.8
CaO	9.4 ± 1.0	2.3 ± 1.7
Na ₂ O	2.8 ± 0.4	0.1 ± 0.1
K ₂ O	0.5 ± 0.2	0.1 ± 0.0
P ₂ O ₅	0.2 ± 0.0	0.0 ± 0.0
LOI	1.3 ± 0.8	3.5 ± 4.9
Total	99.8 ± 0.3	99.1 ± 4.0
CaO+MgO+FeO	25.5 ± 3.6	48.3 ± 8.5
$t_{CO_2}/t_{Gestein}$	0.20	0.48



5 Diskussion der Resultate

Das ausgeführte Screening zeigt, dass in der Schweiz Vorkommen³ für die CO₂-Mineralisierung vorhanden sind. Die Wirtgesteinsvorkommen liegen in der Schweiz mehrheitlich in voralpinen bis hochalpinen Regionen der Kantone Wallis, Bern, Tessin, Glarus, St. Gallen und Graubünden. Diese Vorkommen dürften teilweise aufgrund der Topografie und der fehlenden Infrastruktur schwer zugänglich sein. Allerdings zeigen stillgelegte und im Betrieb stehende Steinbrüche, dass je nach Situation auch in voralpinen bis teils alpinen Regionen Gesteine in grösseren Volumina abgebaut werden können. Im Kanton Tessin kommen Wirtgesteinsvorkommen auch im oder in der Nähe des Talbodens vor, wo sie einfacher zugänglich sind.

Die identifizierten Wirtgesteinsvorkommen in der Schweiz setzen sich grösstenteils aus mittel bis stark metamorphen Gesteinen zusammen. Generell stellt die Metamorphose einen isochemischen Umwandlungsprozess der Mineralien dar. Das bedeutet, dass die Gesamtchemie bei der Metamorphose mehr oder weniger unverändert bleibt. Die tatsächlich vorhandenen Mineralien, in der die chemischen Elemente vorkommen, wirkt sich jedoch direkt auf ihre Reaktionsgeschwindigkeit und ihre letztendliche (thermodynamische) Stabilität bei Kontakt mit CO₂-haltigem Wasser aus. Während beispielsweise frischer vulkanischer Basalt und Metabasalt im Wesentlichen die gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen, reagiert in Wasser gelöstes CO₂ stärker mit den schwach gebundenen Elementen in basaltischem Glas als mit den stark gebundenen Elementen in metamorphen Mineralien (Kelemen et al., 2019). Einen starken Einfluss hat die Metamorphose ebenfalls auf die petrophysikalischen Eigenschaften des Gesteins. Mit zunehmendem Metamorphosegrad nimmt die Porosität und damit verbunden auch die Permeabilität deutlich ab. Die betrachteten Wirtgesteine weisen einen mittleren bis hohen Metamorphosegrad auf. Es ist deshalb davon auszugehen, dass in der Schweiz Reservoirs bestehend aus metamorphen Wirtgesteinen für in-situ Karbonatisierung eine geringe Matrix-Porosität und -Permeabilität aufweisen. Aufgrund der Verformung während der alpinen Orogenese sind die Gesteine jedoch oft von einem Netzwerk von Brüchen und Klüften durchzogen. Dieses Netzwerk stellt Wegsamkeiten für die Injektion von CO₂-haltigem Wasser dar, hat aber gegenüber einem porösen Reservoir zwei entscheidende Nachteile:

- (1) Die Ausdehnung und Konnektivität des Bruchnetzwerkes sind schwierig zu bestimmen. Das Ausbreiten des injizierten CO₂ ist deshalb kaum vorhersehbar. Zudem gibt es in solchen von Brüchen durchzogenen Reservoirs meist keine abdichtende Schicht gegen oben, die das CO₂-haltige Wasser im Untergrund zurückhält. Da sich die Karbonatisierung aber auch unter idealen Umständen wie sie z.B. im CarbFix Reservoir auftreten, über Wochen bis Monate erstreckt, ist eine solche Schicht zwingend notwendig.
- (2) Karbonatisierung in geklüfteten Reservoirs mit geringer Matrixporosität benötigt ein viel grösseres Gesteinsvolumen, da die reaktiven Oberflächen um ein Vielfaches kleiner sind. In einem porösen Reservoir finden die Mineralreaktionen im gesamten zugänglichen Porenraum statt. In einem geklüfteten System findet die Karbonatisierung beinahe ausschliesslich entlang der Bruchflächen statt wo viel weniger reaktive Mineraloberflächen zur Verfügung stehen. Mit der Zeit wird der Unterschied zwischen den beiden Reservoirtypen verstärkt, da es zu einer Passivierung der reaktiven Oberflächen kommt, d.h. die reaktiven Mineralien werden von einer nicht-reaktiven Schicht aus Karbonatmineralien umgeben und reagieren nicht mehr oder nur in stark verringertem Masse.

Metamorphe Wirtgesteine sind somit eher prädestiniert für die ex-situ Karbonatisierung.

³ Ein Vorkommen ist eine natürliche Konzentration an mineralischen Rohstoffen von potenziell wirtschaftlichem Interesse. Die rohstoffgeologischen Eigenschaften (Qualität und Tonnagen) sind (noch) nicht genügend untersucht und/oder die wirtschaftliche und technische Abbaubarkeit und der rechtliche Zugang sind nicht nachweisbar oder (noch) nicht geprüft.



Unter den metamorphen Wirtgesteinen weisen Peridotite den höchsten Anteil an reaktiven Mineralien und damit die höchste theoretische Speicherkapazität⁴ ($t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}} \sim 0.5$) auf, was bedeutet, dass theoretisch rund 0.5 Tonnen CO₂ pro Tonne Peridotit gespeichert werden kann. Für die CO₂-Mineralisierung interessante Peridotit-Vorkommen befinden sich im Kanton Tessin assoziiert mit der Ivrea-Zone, der Iorio-Tonale Linie und der Strona-Ceneri-Zone (Pfiffner, 2009; Tabelle 5). Diese Vorkommen liegen dort teils im oder in der Nähe zum Talboden, wo beispielsweise bei Giubiasco eine KVA angesiedelt ist. Ein weiteres interessantes, lokal auftretendes Wirtgesteinsvorkommen im Kanton Tessin stellen die Andesite am Lago di Lugano dar. Diese Andesite verfügen über eine theoretische Speicherkapazität von rund 0.15 Tonnen CO₂ pro Tonne Andesit⁴.

Die sedimentären Wirtgesteinsvorkommen beschränken sich im Wesentlichen auf die Taveyannaz-Sandsteine im Nordhelvetischen-Flysch. Obwohl der Anteil an reaktiven Mineralien in diesen Vorkommen im Vergleich zum Peridotit geringer ist, treten die Taveyannaz-Sandsteine verbreitet über den gesamten Alpenbogen in unterschiedlichen Tiefenlagen in der Schweiz auf und können tektonisch bedingt Mächtigkeiten bis 800 m erreichen. Sie stellen somit vermutlich ein beträchtliches, derzeit nicht genauer bezifferbares Volumen an potenziellem Wirtgestein für die Karbonatisierung dar mit einer theoretischen Speicherkapazität $t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}} \sim 0.12$. Seemann & Scherer (1984) dokumentieren für die Taveyannaz-Sandsteine Porositäten < 6.5 Vol.-% und Permeabilitäten < 2.5 mD. Beim Bau des Lötschberg Basistunnel wurden in den Taveyannaz-Sandsteinen kaum Wasserzutritte verzeichnet (Vuilleumier et al., 1997). Diese vermutlich schlechten Reservoireigenschaften werden auf die schlechte Sortierung und auf die ursprünglich hohe Konzentration an glasigen Komponenten zurückgeführt, die während der Diagenese in Tonminerale umgewandelt wurden. Inwiefern sich diese Eigenschaften auf andere Standorte in der Schweiz übertragen lässt, müsste genauer untersucht werden.

Die glaukonitführende Garschella-Formation wird zwar als potenzielles Wirtgesteinsvorkommen aufgeführt. Aufgrund der geringen Mächtigkeit und des ungeprüften Anteils an reaktiven Mineralien ist deren Potenzial für eine CO₂-Karbonatisierung jedoch fraglich.

Mit dem vorliegenden Screening wurde auch der Frage nach dem Speicherpotenzial der CO₂-Mineralisierung in der Schweiz nachgegangen. Diese Frage war insbesondere von grossem Interesse für die beiden Industriepartner VBSA und Cemsuisse. Im Rahmen dieses Screenings wird für die Wirtgesteine eine theoretische maximale Speicherkapazität⁴ $t_{\text{CO}_2} / t_{\text{Gestein}}$ (Tonne CO₂ pro Tonne Ausgangsgestein) angegeben. Diese Angabe leitet sich aus dem quantitativen, reaktiven Mineralbestand eines spezifischen Wirtgesteins ab. Sie ist deshalb theoretisch, weil darin weder die Kinetik (entspricht ungefähr der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit) noch die Karbonisierungsmethode (ex-situ, oberflächlich, in-situ) berücksichtigt wird. Diese beiden Faktoren haben aber einen entscheidenden Einfluss auf das technisch realisierbare Speicherpotenzial eines Wirtgesteins resp. eines Reservoirs. Aus dem CarbFix-Projekt auf Island ist bekannt (siehe Kapitel 3.2.3), dass derzeit ca. 12'000 t CO₂/Jahr in-situ sequestriert werden. Damit hat dieses Pilotprojekt den «proof of concept» erbracht und weitere Ausbauschritte sollen folgen, um die Speicherkapazität zu erhöhen. Eine 1:1-Übertragung dieses Konzeptes auf die Schweiz ist allerdings aufgrund der unterschiedlichen geologischen Gegebenheiten (frischer, glasiger Basalt in Island versus vollständig kristallisierte, meist metamorph überprägte Wirtgesteine in der Schweiz) nicht ohne zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu erreichen. Die ex-situ und oberflächige Karbonatisierung zeigen zwar vielversprechende Lösungsansätze. Allerdings sind diese Technologien derzeit noch als unreif zu bezeichnen; d.h. die Anwendung findet im Labor resp. in ersten Pilotprojekten statt. Es wird sich erst noch zeigen müssen, wie und in welcher Grössenordnung ex-situ und oberflächige CO₂-Mineralisierung in Zukunft tatsächlich einen Beitrag zur Speicherung von CO₂ leisten können. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Screenings nur eine theoretische, rein chemisch abgestützte Speicherkapazität angegeben. Mit folgendem Gedankenexperiment wird versucht, das Speicherpotenzial für CO₂-Mineralisierung in der Schweiz einzuordnen:

⁴ Die erwähnten theoretischen (stöchiometrischen) Speicherkapazitäten lassen sich in einem optimierten ex-situ Verfahren (binahe) erreichen. Für die in-situ Karbonatisierung ist die zu erwartende Speicherkapazität kaum abschätzbar, da sie von vielen unbekanntem Faktoren abhängt (z.B. Reservoirpermeabilität, in-situ Temperatur). Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass mehr als ein paar Prozent der theoretischen Speicherkapazität in einem in-situ Verfahren erreicht werden können. Dies gilt für alle untersuchten Lithologien.



In der folgenden Tabelle 8 sind die CO₂-Emissionen aller KVAs und der Zementindustrie im Jahr 2020 aufgeführt. Zusätzlich aufgeführt ist auch der angestrebte Richtwert der Schweiz für inländische CO₂-Speicherung ab 2050. Ausgehend von diesen Emissionen und dem Richtwert wurde mit Hilfe der theoretischen Speicherkapazität ($t_{CO_2} / t_{Gestein}$ variierend zw. 0.2 bis 0.5) die Tonnage reaktives Ausgangsgestein berechnet, welche für ex-situ resp. oberflächige CO₂-Karbonatisierung notwendig wäre. Diese Tonnage pro Jahr wird dann der Tonnage Ausbruchmaterial gegenübergestellt, welche die Zement- und Hartsteinindustrie im Jahr 2017 abgebaut hat. Ebenfalls angegeben wird die Anzahl Bohrungen, die pro Jahr notwendig wären, um analog zu CarbFix CO₂ in-situ zu sequestrieren (unter der Annahme, dass die Karbonisierungskapazität eines jeden Bohrlochs schnell erschöpft ist und nicht wieder verwendet werden kann⁵).

Tabelle 8: Einordnung des Speicherpotenzials in der Schweiz für die CO₂-Karbonatisierung. Die Einheit [t] steht für Tonne. Weitere Erklärungen sind Text nachzulesen.

	CO ₂ -Emission [Mio. t / Jahr]	Ausgangsgestein für ex-situ oder oberflächige Karbonatisierung [Mio. t / Jahr]	Ausbruch für Zement und Hartgesteine [Mio. t / Jahr] (swisstopo 2017).	Anzahl Bohrungen für in-situ Karbonatisierung (analog CarbFix) / Jahr
KVA's (2020)	2.1	4.2 – 10.5	5.1 + 2.0 = 7.1	175
Zementindustrie (2020)	2.4	4.8 – 12.0		200
Schweiz 2050 (Richtwert für inländische Speicherung)	3.0	6.0 – 15.0		215

In Bezug auf ex-situ und oberflächige Karbonatisierung liegen die dafür notwendigen jährlichen Tonnagen Ausgangsgestein in der Grössenordnung der jährlich aus Steinbrüchen gewonnenen Rohstoffe für die Zement- und Hartgesteinsindustrie. Angenommen es könnten reaktive Gesteine in ähnlichen Tonnagen abgebaut, liesse sich damit ein nicht vernachlässigbarer Beitrag zur Reduktion von CO₂ erreichen, sofern die Technologie für ex-situ und oberflächige Karbonatisierung im industriellen Massstab anwendbar wäre. Für die in-situ Karbonatisierung wären gemäss heutigem Technologiestand in Analogie mit CarbFix hunderte von Bohrungen pro Jahr notwendig⁵.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Schlussfolgerungen

Aus dem durchgeführten Screening können folgende Schlussfolgerungen für die Karbonatisierung in der Schweiz gezogen werden:

- Die Schweiz verfügt über Wirtgesteinsvorkommen mit reaktiven Mineralien für die Karbonatisierung. In diesem Zusammenhang sind reaktive Mineralien diejenigen, die reich an FeO, MgO und CaO sind und nicht bereits CO₂ enthalten.

⁵ Selbst wenn die Risse in der Umgebung eines Bohrlochs durch die Bildung von Karbonatmineralien verstopft sind, kann die Lebensdauer des CO₂-Injektionsbohrlochs verlängert werden, indem durch Fracking neue reaktive Risse geschaffen werden. Für den Fall, dass dieses Verfahren aufgrund des Erdbebenrisikos inakzeptabel ist, ist die Anzahl der erforderlichen neuen Bohrungen pro Jahr in Tabelle 8 angegeben.



- Metamorphe und plutonische Wirtgesteine weisen gemäss dem Screening das grösste Verbreitungsgebiet auf (~726 km²). Typische Wirtgesteine sind Peridotit, Serpentinotit oder Amphibolit. Die Vorkommen treten in den Alpen und südliche davon auf und weisen den grössten Anteil an reaktiven Mineralien (20 – 50 Gew.-%) auf. Da sich jedes Molekül reaktiven FeO, MgO und CaO potenziell mit einem Molekül CO₂ zu Karbonatmineralen verbinden kann, haben diese metamorphen und plutonischen Wirtgesteine die höchste theoretische Speicherkapazität aller Gesteine in der Schweiz ($t_{CO_2} / t_{Gestein} \sim 0.2 - 0.5$).
- Sedimentäre Wirtgesteine treten hauptsächlich im Nordhelvetischen Flysch (nördlich der Alpen) auf. Als Wirtgestein wurden die Taveyannaz-Sandsteine identifiziert, die einen Anteil an reaktiven Mineralien von 15 – 20 Gew.-% aufweisen und eine theoretische Speicherkapazität von $t_{CO_2} / t_{Gestein} \sim 0.1$.
- Ausgehend von den genannten geologischen Voraussetzungen und unter Einbezug der in diesem Bericht diskutierten Verfahren gehen wir davon aus, dass die ex-situ Karbonatisierung derzeit in der Schweiz das höchste Potenzial aufweist, obwohl das technische, tatsächlich nutzbare Speicherpotenzial⁶ durch äussere Faktoren wie Zugänglichkeit und Abbaubarkeit der Wirtgesteinsvorkommen, Energie- und CO₂-Bilanzierungen, regulatorischen Einschränkungen, Zielkonflikten mit Landwirtschaft und Tourismus beschränkt werden dürfte.
- Die geologischen Voraussetzungen für eine in-situ Karbonatisierung beurteilen wir in der Schweiz als schwierig, weil die dafür notwendigen Reservoirereigenschaften im Untergrund in der Regel nicht bekannt sind und nur mit Hilfe von systematisch durchgeführten Sondierkampagnen beurteilt werden können. Auch die Erfahrungen aus dem Projekt CarbFix auf Island (in-situ Karbonatisierung) sind nur bedingt bis gar nicht auf die Schweiz übertragbar, weil die geologischen Voraussetzungen zu unterschiedlich sind.

6.2 Ausblick

Wir empfehlen die ex-situ Karbonatisierung von metamorphen und plutonischen Wirtgesteinen in den Fokus zu rücken und weiterzuverfolgen mit dem Ziel das technische Speicherpotenzial⁶ zu konkretisieren. Dafür wären aus unserer Sicht folgende Fragestellungen anzugehen:

- Wie viel Energie ist für den Abbau, für das Zerreiben, für den Transport und für die ex-situ Karbonatisierung von reaktivem Wirtgestein notwendig?
- Können bereits bestehende reaktive Wirtgesteine, die beispielsweise auf Deponien lagern, verwendet werden? Wo in der Schweiz gibt es solche Deponien und wieviel Material wird dort gelagert?
- Wie sind die jeweiligen Energie- und CO₂-Bilanzen zu beurteilen?
- Sind in der Schweiz Untertagebauprojekte (Tunnels, Stollen, ...) in Planung, wo reaktive Mineralien ausgebrochen und für eine ex-situ Mineralisierung genutzt werden könnten?
- Welche regulatorischen / gesetzlichen Beschränkungen existieren in der Schweiz und welche Konsequenzen entstehen daraus für die ex-situ Karbonatisierung?
- Wo in der Schweiz ergeben sich durch die Beantwortung der genannten Fragestellungen günstige Opportunitäten für ex-situ Karbonatisierung?

In Bezug auf die in-situ Karbonatisierung empfehlen wir die Datengrundlage zur Beurteilung der Eignung und des Speicherpotenzials von Wirtgesteinsvorkommen im Untergrund zu erweitern. Sei es über spezifische Forschungs- und Erkundungsprogramme oder indem Synergien mit anderen Projekten zur

⁶ Technisches Speicherpotenzial: Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Beachtung vorhandener Beschränkungen nutzbar ist. Die Beschränkungen können u.a. technischer, struktureller oder gesetzlicher Natur sein.



Nutzung des Untergrundes geprüft werden. Beispielsweise könnten in einer Tiefbohrung für Geothermie nicht nur die für die Geothermie interessanten Gesteinsschichten untersucht werden, sondern auch die für eine in-situ Karbonatisierung interessanten Gesteinsschichten (Multipurpose-Exploration).

7 Literaturverzeichnis

Blondes, M. S., Merrill, M. D., Anderson, S. T., & DeVera, C. A. (2019). Carbon dioxide mineralization feasibility in the United States. Scientific Investigations Report-US Geological Survey, (2018-5079).

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., & Zweigel, P. (2008). Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers-observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects (Vol. 14). British Geological Survey.

Chevalier, G., Diamond, L.W. and Leu, W. (2010). Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. Swiss Journal of Geosciences 103, 427-455.

Desmurs, L., Müntener, O., & Manatschal, G. (2002). Onset of magmatic accretion within a magma-poor rifted margin: a case study from the Platta ocean-continent transition, eastern Switzerland. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(3), 365-382.

Diamond L.W. (2019) Revised potential of the Upper Muschelkalk Formation (Central Swiss Plateau) for CO₂ 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. und Chevalier, G. (2010). Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂ Sequestrierung. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE (SI/500325-01 und SI/500386-02), Bern, 23 pp.

Evans, B. W., & Trommsdorff, V. (1978). Petrogenesis of garnet Iherzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. Earth and Planetary Science Letters, 40(3), 333-348.

García del Real, P., & Vishal, V. (2016). Mineral carbonation in ultramafic and basaltic rocks. Geologic carbon sequestration: Understanding reservoir behavior, 213-229.

Hartmann, G., & Wedepohl, K. H. (1993). The composition of peridotite tectonites from the Ivrea Complex, northern Italy: residues from melt extraction. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(8), 1761-1782.

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

Hovorka, S. & Kelemen, P. (2021). The Building Blocks of CDR Systems: Geological Sequestration. CDR Primer, edited by J. Wilcox, B. Kolosz, J. Freemann.

Kelemen, P., Benson, S. M., Pilorgé, H., Psarras, P., & Wilcox, J. (2019). An overview of the status and challenges of CO₂ storage in minerals and geological formations. Frontiers in Climate, 1, 9.

Lahusen, P.H. & Wyss, R. (1995). Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure 62 (141), 43-72.



- Leu, W. (2012). Swiss oil/gas exploration and lessons learnt. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 17(1), 49–59.
- Leu, W. & Siddiqi, G. (2013). CO₂-Sequestration in Switzerland? *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 18(2), 105-113.
- Lu, M., Hofmann, A. W., Mazzucchelli, M., & Rivalenti, G. (1997). The mafic-ultramafic complex near Finero (Ivrea-Verbanò Zone), I. Chemistry of MORB-like magmas. *Chemical Geology*, 140(3-4), 207-222.
- Melcher, F., Meisel, T., Puhl, J., & Koller, F. (2002). Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry. *Lithos*, 65(1-2), 69-112.
- Mervine, E. M., Wilson, S. A., Power, I. M., Dipple, G. M., Turvey, C. C., Hamilton, J. L., ... & Southam, G. (2018). Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology*, 112, 755-765.
- Menkveld-Gfeller, U., Kempf, O., & Funk, H. (2016). Lithostratigraphic units of the Helvetic Palaeogene: Review, new definition, new classification. *Swiss Journal of Geosciences*, 109, 171-199.
- Meyer, J. (2022). *Gesteine der Schweiz. Der Feldführer. 2. Auflage.* Haupt Verlag.
- Nagra (2008). Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. *Geologische Grundlagen. Techn. Ber. NTB 08-04. Beilage 2.2-1; Beilage 2.2-2; Beilage 2.2-3.*
- NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2019). *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda.* Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>.
- Pfiffner, O.A. (2009). *Geologie der Alpen. 1. Auflage.* Haupt Verlag.
- Pini, R., Ottiger, S., Burlini, L., Storti, G., & Mazzotti, M. (2010). Sorption of carbon dioxide, methane and nitrogen in dry coals at high pressure and moderate temperature. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(1), 90-101.
- Rahn, M., Stern, W. B., & Frey, M. (1995). The origin of the Taveyannaz Sandstone – Arguments from whole rock and clinopyroxene composition. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 75(2), 213-224.
- Schaltegger, U., Gebauer, D., & von Quadt, A. (2002). The mafic–ultramafic rock association of Loderio–Biasca (lower Pennine nappes, Ticino, Switzerland): Cambrian oceanic magmatism and its bearing on early Paleozoic paleogeography. *Chemical Geology*, 186(3-4), 265-279.
- Schaltegger, U., Nägler, T., Corfu, F., Maggetti, M., Galetti, G., & Stosch, H. G. (1997). A Cambrian island arc in the Silvretta nappe: constraints from geochemistry and geochronology. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 77(3), 337-350.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2022). CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET). Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können. Bericht des Bundesrates vom 18. Mai 2022.
- Seemann, U., & Scherer, M. (1984). Volcaniclastics as potential hydrocarbon reservoirs. *Clay Minerals*, 19(3), 457-470.



Sills, J. D., & Tarney, J. (1984). Petrogenesis and tectonic significance of amphibolites interlayered with metasedimentary gneisses in the Ivrea Zone, Southern Alps, Northwest Italy. *Tectonophysics*, 107(3-4), 187-206.

Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 90-102.

Stucki, A., Rubatto, D., & Trommsdorff, V. (2003). Mesozoic ophiolite relics in the Southern Steep Belt of the Central Alps. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 83(3), 285-299.

swisstopo (2017). Bericht über die Versorgung der Schweiz mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen (Bericht mineralische Rohstoffe). *Ber. Landesgeol.* 11 (nur als pdf).

Trommsdorff, V., Dietrich, V. (1999). Grundzüge der Erdwissenschaften. Kristallographie, Mineralogie, Petrographie. Skript Vorlesung für Universität und ETH Zürich. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Ulrich, T., & Borsien, G. R. (1996). Fedoz metagabbro and Forno metabasalt (Val Malenco, N Italy): Comparative petrographic and geochemical investigations. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 76(3), 521-535.

VBSA (2022). Klimaneutralität: Kehrrechtverwertungsanlagen übernehmen Pionierrolle. Medienmitteilung vom 16. März 2022.

Vuagnat M. (1952) : *Pétrographie, répartition et origine des microbrèches du Flysch nordhelvétique*. Mat. Carte géol. Suisse (N.S.) 97, 129 pages.

Vuilleumier, F., Teuscher, P., & Beer, R. (1997). The Lötschberg railway base tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 12(3), 361-368.

Winnefeld, F., Leemann, A., German, A., & Lothenbach, B. (2022). CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100672.

White, S. K., Spane, F. A., Schaef, H. T., Miller, Q. R., White, M. D., Horner, J. A., & McGrail, B. P. (2020). Quantification of CO₂ mineralization at the Wallula Basalt Pilot project. *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14609-14616.



8 Anhang

- Anhang 1: Übersicht Screening inkl. Querprofile
- Anhang 2: Plutonische Wirtgesteinsvorkommen inkl. Querprofile
- Anhang 3: Vulkanische Wirtgesteinsvorkommen inkl. Querprofile
- Anhang 4: Metamorphe Wirtgesteinsvorkommen inkl. Querprofile
- Anhang 5: Sedimentäre Wirtgesteinsvorkommen inkl. Querprofile
- Anhang 6: Schlüsseltabelle Profilschnitte