



**Schlussbericht vom 30. Januar 2026**

---

## DynCO2

# Entwicklung eines dynamischen CO<sub>2</sub>-Minde- rungs- und Removalmarkts: Konzeptstudie und Umsetzungsperspektiven

---



**Abbildung 1:** Obertägige Komponenten einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur am Beispiel des Quest Carbon Capture and Storage (CCS) Projekts in Kanada. Seit 2015 werden im Rahmen des Quest CCS-Projekts in Alberta, Kanada, jährlich rund 1 Million Tonnen CO<sub>2</sub> (ca. 30 kg/s) in 2'000 bis 2'500 Metern Tiefe dauerhaft geologisch gespeichert. Von drei verfügbaren Injektionsbohrungen ist derzeit nur eine aktiv in Betrieb. Der unterirdische Speicher erstreckt sich über 3'700 km<sup>2</sup> und ist für ein Gesamtvolumen von 25 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> konzessioniert. Bislang wurden etwa 10 Millionen Tonnen injiziert – diese erzeugen im Speichergestein eine CO<sub>2</sub>-Fahne mit rund 50 km<sup>2</sup> Ausdehnung und etwa 40 Metern Mächtigkeit.

Textquellen: Alberta Energy Outlook 2025 report (ST98) [29], Statistics and Data, Quest 2022 annual status report [26], Shell Sustainability Report 2023 [25]

Bildquelle: Gunter Siddiqi, 2017.



# conim<sup>ag</sup> concepts. implementation.

---

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

**Ko-Finanzierung:** N.A.

**Subventionsempfängerin:**

conim AG  
CH-8032 Zürich  
<https://conim.ch>

**Autor/in:**

Janine Stampfli, conim AG, [js@conim.ch](mailto:js@conim.ch)  
Gunter Siddiqi, conim AG, [gs@conim.ch](mailto:gs@conim.ch)  
Urs Keiser, conim AG, [uk@conim.ch](mailto:uk@conim.ch)  
Gabriele Butti, conim AG, [gb@conim.ch](mailto:gb@conim.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Elena-Lavinia Niederhaeuser, [elena-lavinia.niederhaeuser@bfe.admin.ch](mailto:elena-lavinia.niederhaeuser@bfe.admin.ch)  
Christian Minnig, [christian.minnig@bfe.admin.ch](mailto:christian.minnig@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502886-01

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



## Zusammenfassung

Die Studie «DynCO<sub>2</sub>» ist vor dem Hintergrund des schweizerischen Netto-Null-Ziels bis 2050 entstanden und adressiert die wachsende Bedeutung von Carbon Capture and Storage (CCS) sowie von Technologien zur dauerhaften CO<sub>2</sub>-Removal (oder Entfernung). Nach Emissionsvermeidung wird künftig eine leistungsfähige Infrastruktur für den Transport und die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> benötigt, um CO<sub>2</sub>-Minderung und -Removal im grossskaligen Massstab zu ermöglichen. Während für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bereits erste Anwendungen existieren, bestehen insbesondere für den Transport über Rohrleitungen und für geologische CO<sub>2</sub>-Speicher erhebliche Wissenslücken hinsichtlich Geschäftskonzepten, Organisation des Kohlenstoffmarktes sowie rechtlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen. Ziel der Studie war es daher, praxistaugliche Geschäftskonzepte für diese Infrastrukturen zu beleuchten und aufzuzeigen, wie ein funktionsfähiger CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkt in der Schweiz ausgestaltet werden kann.

Methodisch stützt sich die Studie auf eine strukturierte Analyse in drei Arbeitsschritten. *Erstens* wurden mittels CANVAS-Ansatz Zielbilder von Geschäftskonzepten für CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber beleuchtet, unter Berücksichtigung der monopolistischen Eigenschaften dieser Infrastrukturen. *Zweitens* erfolgte eine Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen. *Drittens* wurden ökonomische Aspekte untersucht, insbesondere Investitions- und Betriebskosten, und daraus umsetzungsorientierte Handlungsempfehlungen abgeleitet. Zur Veranschaulichung diente ein konzeptioneller, fiktiver CCS-Hub im Raum Bern/Solothurn, der verschiedenen Emittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen, ein CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz und mehrere geologische CO<sub>2</sub>-Speicher integriert. Die Klasse 5 Kostenschätzung (Konzeptionelle Planung) ergab diskontierte Transportkosten von CHF 21 pro Tonne CO<sub>2</sub> und diskontierte Speicherkosten von CHF 36 pro Tonne CO<sub>2</sub>.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Markteinführung und Marktdurchsetzung von CCS-Technologien ohne eine aktive Rolle der öffentlichen Hand kaum realisierbar ist. Aufgrund hoher Anfangsinvestitionen, langer Projektlaufzeiten und erheblicher Unsicherheiten besteht derzeit weder ein tragfähiger Markt für CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherungen noch ausreichende Investitionsbereitschaft privater Akteure. Gemäss dem gewählten illustrativen Beispiel ist die starke Orientierung an den Regelungen der Europäischen Union sinnvoll, etwa über einen autonomen Nachvollzug der Schweiz insbesondere im Bereich der CCS-Richtlinie und über andere Verordnungen wie beispielsweise die CRCF-Verordnung. Ein zentraler Befund ist, dass CO<sub>2</sub>, das für die geologische Speicherung bestimmt ist, als handelbares Gut («commodity») zu definieren und ähnlich wie in der EU gehandhabt durch Ausnahme vom Abfallrecht rechtlich abzusichern ist, was unter Umständen eine Verfassungsänderung bedingen könnte. Spezielle Zertifikate für die permanente Entnahme durch geologische Speicherung haben einen ökonomischen Wert und werden so ein Baustein für einen funktionierenden Markt. Gleichzeitig spricht vieles für eine starke Marktregulierung der Transport- und Speicherinfrastrukturen mit diskriminierungsfreiem Zugang, transparenter Preisbildung und einer unabhängigen Aufsichtsbehörde, analog zu bestehenden Regulierungen im Energie- oder Rohrleitungsbereich. Für die Planung und den Bau der Infrastrukturen ist der Einsatz raumplanerischer Instrumente wie Sachpläne auf Stufe Bund, die Einbettung der Infrastrukturen in kantonale Richtpläne, sowie Nutzungsplanungen und Bewilligungen für die Sicherung der Nutzung sinnvoll. Ein konzentrierendes Plangenehmigungsverfahren reduziert das Risiko von Verzögerungen und Blockaden, um die bereits heute stark verspäteten Infrastrukturen so schnell wie möglich und im Einklang mit den 2050 Netto-Null-Zielen fertigzustellen.

Insgesamt kommt die Studie zum Schluss, dass die Entwicklung und Umsetzung geeigneter Geschäftskonzepte eine gezielte staatliche Unterstützung und Koordinierung erfordern, um Lernkurven zu ermöglichen, Risiken zu reduzieren und eine wirtschaftlich tragfähige Infrastruktur aufzubauen. Gelingt dies, können CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologische CO<sub>2</sub>-Speicher langfristig zu wichtigen inländischen Bausteinen der Schweizer Klimapolitik werden und sowohl inländische Emissionsminderungen als auch CO<sub>2</sub>-Entnahmen in einem integrierten Kontext unterstützen.



## Résumé

L'étude «DynCO2» a été réalisée dans le contexte de l'objectif suisse de zéro émission nette d'ici 2050 et aborde l'importance croissante des technologies de captage et du stockage du carbone (CSC) technologies pour l'élimination permanente du CO<sub>2</sub>. Après la prévention des émissions, une infrastructure performante sera nécessaire à l'avenir pour le transport et le stockage géologique du CO<sub>2</sub> afin de permettre la réduction et l'élimination du CO<sub>2</sub> à grande échelle. Alors que les premières applications existent déjà pour le captage du CO<sub>2</sub>, il existe encore des lacunes importantes en matière de concepts commerciaux, d'organisation du marché du carbone et de cadre juridique et réglementaire, en particulier pour le transport par pipeline et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. L'objectif de l'étude était donc d'examiner des concepts commerciaux pratiques pour ces infrastructures et de montrer comment un marché fonctionnel de réduction et d'élimination du CO<sub>2</sub> pourrait être mis en place en Suisse.

Sur le plan méthodologique, l'étude s'appuie sur une analyse structurée en trois étapes. *Tout d'abord*, la systématique CANVAS a été utilisée pour mettre en lumière les objectifs visés par les concepts commerciaux des exploitants de pipelines et de sites de stockage géologique du CO<sub>2</sub>, en tenant compte des caractéristiques monopolistiques de ces infrastructures. *Ensuite*, une analyse du cadre juridique a été réalisée. *Troisièmement*, les aspects économiques ont été examinés, en particulier les coûts d'investissement et d'exploitation, et des recommandations d'action orientées vers la mise en œuvre ont été formulées à partir de ces résultats. À titre d'illustration, un hub CCS conceptuel fictif dans la région de Berne/Soleure a été utilisé, intégrant différents émetteurs avec des installations de capture du CO<sub>2</sub>, un réseau de pipelines de CO<sub>2</sub> et plusieurs sites de stockage géologique du CO<sub>2</sub>. L'estimation des coûts de classe 5 (planification conceptuelle) a donné des coûts de transport actualisés de CHF 21 par tonne de CO<sub>2</sub> et des coûts de stockage actualisés de CHF 36 par tonne de CO<sub>2</sub>.

Les résultats montrent que la mise sur le marché et l'implantation des technologies CSC ne sont guère réalisables sans une intervention active des pouvoirs publics. En raison des investissements initiaux élevés, de la longue durée des projets et des incertitudes considérables, il n'existe actuellement ni marché viable pour le transport du CO<sub>2</sub> par canalisation et de stockage géologique du CO<sub>2</sub>, ni volonté suffisante d'investir de la part des acteurs privés. Selon l'exemple illustratif choisi, il est judicieux de s'aligner étroitement sur les réglementations de l'Union européenne, par exemple par une mise en œuvre autonome par la Suisse en particulier dans le domaine de la directive CCS et d'autres règlements tels que le règlement CRCF. Une conclusion centrale est que le CO<sub>2</sub> destiné au stockage géologique est à définir comme une marchandise négociable («commodity») et bénéficier d'une sécurité juridique similaire à celui de l'UE grâce à une dérogation à la législation sur les déchets, ce qui pourrait, dans certaines circonstances, nécessiter une modification de la Constitution. Les certificats spéciaux pour le retrait permanent par stockage géologique ont une valeur économique et constituent ainsi un élément essentiel pour le bon fonctionnement du marché. Parallèlement, de nombreux arguments plaident en faveur d'une forte régulation du marché des infrastructures de transport et de stockage, avec un accès non discriminatoire, une tarification transparente et une autorité de surveillance indépendante, à l'instar des réglementations existantes dans le domaine de l'énergie ou des pipelines. Pour la planification et la construction des infrastructures, il est judicieux d'utiliser des instruments d'aménagement du territoire tels que les plans sectoriels au niveau fédéral, d'intégrer les infrastructures dans les plans directeurs cantonaux et de prévoir des plans d'utilisation et des autorisations afin de garantir leur exploitation. Une procédure de planification concentrée réduit les risques de retards et de blocages afin de réaliser le plus rapidement possible les infrastructures, qui accusent déjà aujourd'hui un retard important, conformément aux objectifs de zéro émission nette pour 2050.

Dans l'ensemble, l'étude conclut que l'élaboration et la mise en œuvre de modèles commerciaux appropriés nécessitent un soutien et une coordination ciblés de la part des pouvoirs publics afin de permettre l'apprentissage, de réduire les risques et de mettre en place une infrastructure économiquement viable. Si cela réussit, les pipelines de CO<sub>2</sub> et les sites de stockage géologique du CO<sub>2</sub> pourraient devenir à long terme des éléments importants de la politique climatique suisse et contribuer à la réduction des émissions nationales et à l'élimination du CO<sub>2</sub> dans un contexte intégré.



## Summary

The DynCO<sub>2</sub> study was conducted against the backdrop of Switzerland's net-zero target for 2050 and addresses the growing importance of carbon capture and storage (CCS) technologies for permanent CO<sub>2</sub> removal. In addition to emissions avoidance, an efficient infrastructure for the transport and geological storage of CO<sub>2</sub> will be needed in the future to enable CO<sub>2</sub> reduction and removal on a large scale. While initial applications for CO<sub>2</sub> capture already exist, there are still considerable gaps in knowledge regarding business concepts, the organization of the carbon market, and legal and regulatory frameworks, particularly for transport via pipelines and geological CO<sub>2</sub> storage. The aim of the study was therefore to highlight practical business concepts for these infrastructures and to show how a functioning CO<sub>2</sub> reduction and removal market can be developed in Switzerland.

Methodologically, the study is based on a structured analysis in three steps. *First*, using the CANVAS approach, target images for business concepts for CO<sub>2</sub> pipeline and geological CO<sub>2</sub> storage operators were examined, taking into account the monopolistic characteristics of these infrastructures. *Second*, an analysis of the legal framework was carried out. *Third*, economic aspects were examined, in particular investment and operating costs, and implementation-oriented recommendations for action were derived from this. A conceptual, fictitious CCS-hub in the Bern/Solothurn area was used for illustrative purposes, integrating various emitters with CO<sub>2</sub> capture facilities, a CO<sub>2</sub> pipeline network, and several geological CO<sub>2</sub> storage sites. The Class 5 cost estimate (conceptual planning) resulted in discounted transport costs of CHF 21 per ton of CO<sub>2</sub> and discounted storage costs of CHF 36 per ton of CO<sub>2</sub>.

The results show that the market introduction and market penetration of CCS technologies is not feasible without an active role on the part of the public sector. Due to high initial investments, long project durations, and considerable uncertainties, there is currently neither a viable market for CO<sub>2</sub> pipeline transport and geological CO<sub>2</sub> storage nor sufficient willingness to invest on the part of private investors. According to the illustrative example given, it makes sense to align closely with European Union regulations, for example through Switzerland's autonomous implementation of the CCS Directive and other regulations such as the CRCF Regulation. A key finding is that CO<sub>2</sub> destined for geological storage should be considered a tradable commodity and, as is the case in the EU, legally exempted from waste legislation, which may, under certain circumstances, require a constitutional amendment. Special certificates for permanent removal through geological storage have economic value and thus become a building block for a functioning market. At the same time, there is much to be said for strong market regulation of transport and storage infrastructures with non-discriminatory access, transparent pricing, and an independent supervisory authority, analogous to existing regulations in the energy or pipeline sectors. For the planning and construction of infrastructure, it makes sense to use spatial planning instruments such as sectoral plans at the federal level, the integration of infrastructure into spatial structure plans at the cantonal level, as well as land use plans and permits to enable utilization of space for the infrastructures. A concentrated planning approval process reduces the risk of delays and bottlenecks, enabling the completion of infrastructure projects, which are already significantly behind schedule, as quickly as possible and in line with the 2050 net-zero targets.

Overall, the study concludes that the development and implementation of appropriate business models require targeted government support and coordination in order to enable learning curves, reduce risks, and build an economically viable infrastructure. If this succeeds, CO<sub>2</sub> pipelines and geological CO<sub>2</sub> storage facilities could become important domestic building blocks of Swiss climate policy in the long term, supporting both domestic emission reductions and CO<sub>2</sub> removals in an integrated context.



## Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

### Rahmenbedingungen:

Der Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Transport- und CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur ist eine zentrale Voraussetzung für das Erreichen des Netto-Null-Ziels der Schweiz bis 2050 und kann ohne eine aktive, koordinierende und unterstützende Rolle des Bundes nicht rechtzeitig realisiert werden.

Die rechtliche Definition von CO<sub>2</sub> als handelbares Gut ist eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung eines gut funktionierenden CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkts und trägt dazu bei, kommerzielle Risiken aus unternehmerischer Sicht auf ein akzeptables Mass zu reduzieren.

Die klare Abgrenzung vom Abfallrecht in Anlehnung an europäische Zertifizierungsrahmen schaffen Rechtssicherheit, Markttransparenz und Anschlussfähigkeit an den europäischen Kohlenstoffmarkt.

Die Planung, der Bau und der Betrieb der Infrastrukturen von grosser nationaler Bedeutung werden vereinfacht, wenn der Bund seine Kompetenzen nutzt, um Sachpläne zu erstellen und konzentrierende Plangenehmigungsverfahren zu entwickeln sowie diese gemeinsam mit den Kantonen in den kantonalen Richtplänen zu verankern.

CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologische CO<sub>2</sub>-Speicher weisen die Eigenschaften natürlicher Monopole auf und erfordern daher eine vorausschauende Sektorregulierung. Ein diskriminierungsfreier Zugang, transparente Preise und eine starke unabhängige Aufsicht sind notwendig, um Effizienz, Fairness und volkswirtschaftlich optimale Lösungen sicherzustellen.

### Geschäftskonzepte:

Die frühe und enge Koordination zwischen CO<sub>2</sub>-Emittenten, Infrastrukturbetreibern und staatlichen Stellen ist entscheidend für einen kosteneffizienten Hochlauf von CCS, insbesondere von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur. Fehlende Abstimmung – etwa zwischen Abscheidung, Transport und Speicherung – kann zu erheblichen Verzögerungen und Mehrkosten führen.

Aufgrund technischer, ökonomischer, kommerzieller, organisatorischer und politischer Risiken ist die Investitionsbereitschaft privater Akteure begrenzt. Hohe Anfangsinvestitionen, lange Zeithorizonte, unsichere Vertragsverhältnisse und Koordinationsprobleme sowie Unsicherheiten in der langfristigen Marktentwicklung stellen Hemmnisse dar, deren Überwindung die Unterstützung der öffentlichen Hand erfordert.

Durch einen Fokus auf CCS-Hubs und eine gezielte Innovationsförderung können innovative Geschäftskonzepte entwickelt und implementiert werden und private Akteure erfolgreich an der Einführung und Durchdringung von CCS-Technologien auf dem Kohlenstoffmarkt teilnehmen.



# Inhaltsverzeichnis

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung.....</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>Résumé.....</b>                                             | <b>4</b>  |
| <b>Summary .....</b>                                           | <b>5</b>  |
| <b>Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....</b>             | <b>6</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                                | <b>7</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis / Glossar.....</b>                    | <b>8</b>  |
| <b>1     Einleitung .....</b>                                  | <b>9</b>  |
| 1.1     Kontext und Motivation .....                           | 9         |
| 1.2     Projektziele .....                                     | 12        |
| <b>2     Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion.....</b> | <b>12</b> |
| 2.1     Vorgehen und Methode .....                             | 12        |
| 2.2     Ergebnis.....                                          | 16        |
| 2.3     Diskussion .....                                       | 43        |
| <b>3     Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>             | <b>47</b> |
| <b>4     Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b> | <b>48</b> |
| <b>5     Publikationen und andere Kommunikation .....</b>      | <b>48</b> |
| <b>6     Literaturverzeichnis .....</b>                        | <b>49</b> |
| <b>7     Anhang .....</b>                                      | <b>51</b> |





## Abkürzungsverzeichnis / Glossar

|                 |                                                                                                                                                                                      |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARE             | Bundesamt für Raumentwicklung                                                                                                                                                        |
| BAFU            | Bundesamt für Umwelt                                                                                                                                                                 |
| BFE             | Bundesamt für Energie                                                                                                                                                                |
| CAPEX           | Capital expenditure (Deutsch: Investitionsausgaben)                                                                                                                                  |
| CCS             | Carbon Capture and Storage (Deutsch: CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung)                                                                                                  |
| CCU             | Carbon Capture and Utilisation (Deutsch: CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Nutzung)                                                                                                  |
| CDR             | Carbon Dioxide Removal (Deutsch: Negative CO <sub>2</sub> -Emissionen)                                                                                                               |
| CO <sub>2</sub> | Kohlenstoffdioxid / Kohlendioxid                                                                                                                                                     |
| CRCF            | Carbon Removal Certification Framework (Deutsch: Zertifizierungsrahmen für CO <sub>2</sub> -Entnahmen)                                                                               |
| DAC             | Direct Air Capture (Bezeichnung für ein Verfahren zur Gewinnung von CO <sub>2</sub> aus der Umgebungsluft)                                                                           |
| EHS             | Emissionshandelssystem                                                                                                                                                               |
| IRR             | Internal Rate of Return (Deutsch: Interner Zinsfuss / Zinssatz)                                                                                                                      |
| KVA             | Kehrichtverwertungsanlage                                                                                                                                                            |
| LCOP            | Levelized Costs of Product (Deutsch: Gestehungskosten des Produkts)                                                                                                                  |
| MMV             | Measurement, Monitoring and Verification (Deutsch: Überwachung, Messung und Überprüfung); in der Literatur wird dafür auch MRV («Measurement, Reporting and Verification») verwendet |
| MOD             | Money of the day                                                                                                                                                                     |
| MPa             | Megapascal                                                                                                                                                                           |
| Nagra           | Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle                                                                                                                       |
| NPV             | Net Present Value (Deutsch: Nettobarwert, Kapitalwert)                                                                                                                               |
| OEM             | Original Equipment Manufacturer (Deutsch: Erstausrüster)                                                                                                                             |
| OPEX            | Operational expenditure (Deutsch: Betriebsausgaben)                                                                                                                                  |
| PCRU            | Permanent Carbon Removal Unit (Deutsch: Dauerhafte CO <sub>2</sub> -Entnahmeeinheit)                                                                                                 |
| SVGW            | Fachverband für Wasser, Gas und Wärme                                                                                                                                                |
| THG             | Treibhausgas                                                                                                                                                                         |
| UVEK            | Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation                                                                                                           |
| VBSA            | Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen                                                                                                                       |
| VCM             | Voluntary Carbon Market (Deutsch: Freiwilliger Kohlenstoffmarkt)                                                                                                                     |
| WACC            | Weighted Average Cost of Capital (Deutsch: Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten bzw. kalkulatorischer Zinssatz)                                                                |





# 1 Einleitung

## 1.1 Kontext und Motivation

Die Klimastrategie des Bundes strebt das Ziel «Netto-Null Treibhausgasemissionen» (THG-Emissionen) für das Jahr 2050 an. Das ist im Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit vom 30. September 2022 festgelegt. [1] Zusätzlich zu den Massnahmen zur Minderung von THG-Emissionen (z.B. Elektrifizierung und Effizienzsteigerung) wird gemäss Bundesrat auch eine Transport- und geologische Speicherinfrastruktur für CO<sub>2</sub> notwendig. Diese Infrastrukturen werden genutzt, wenn beispielsweise «Carbon Capture and Storage (CCS)»-Technologien sowohl für CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen wie auch für die dauerhafte CO<sub>2</sub>-Entfernung eingesetzt werden. Dazu ist der Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur sinnvoll, und – sofern das vorhandene Speicherpotenzial der Schweiz erfolgreich in nutzbare Speicherkapazität überführt werden kann – der Einsatz geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher.

Gemäss Bundesrat soll die Entwicklung und der Einsatz von CCS-Technologien in der Schweiz gemäss folgendem Zeitplan erfolgen:

- *Bis 2030: Pionierphase.* Erste Schritte hin zur Anwendung und zum Ausbau von CCS, mit Fokus auf Pilot- und Demonstrationsprojekte. Richtwert im Jahr 2030: Dauerhafte Speicherung von rund 500'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.
- *2031 bis 2050: Gezielte Skalierung.* Schrittweise Errichtung der erforderlichen Infrastruktur für Transport und Speicherung, um den Einsatz von CCS zu ermöglichen. Richtwert: Von 1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2035 bis 7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2050.
- *Spätestens ab 2051: Wettbewerbliche Stufe.*

Voraussetzung für die angestrebte Skalierung ab dem Jahr 2031 ist das Vorhandensein von Regeln für den «CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkt»<sup>1</sup>, damit eine funktionierende CCS-Wertschöpfungskette entstehen kann. Bei CCS umfasst die primäre Wertschöpfungskette die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub>. Die Abscheidung kann nicht nur aus Rauchgasströmen von Punktquellen oder sonstigen industriellen Prozessen, die einen CO<sub>2</sub>-Strom verursachen, erfolgen, sondern auch aus der Luft mittels «Direct Air Capture» (DAC)-Technologien.

In den letzten Jahren haben u.a. das Bundesamt für Energie (BFE) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) verschiedene Vertiefungsarbeiten zu spezifischen Themen realisiert bzw. koordiniert, um die Entwicklung und Anwendung von CCS-Technologien für CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen und CO<sub>2</sub>-Entfernung in der Schweiz vorzubereiten. Beispiele dafür sind Albicker et al. (2023) [2], Butti et al. (2023) [3], Worm et al. (2024) [4], Butti et al. (2024) [5].

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Ausarbeitung praxistauglicher Geschäftsmodelle für den Betrieb von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen sowie geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern – einem Themenfeld, in dem aktuell erheblicher Wissens- und Klärungsbedarf besteht. Die Geschäftskonzepte sollen im Gesamtkontext eines dynamisch funktionierenden CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkts diskutiert werden, einschliesslich Aspekte eines erforderlichen Marktdesigns, das einen wirtschaftlich nachhaltigen Betrieb ermöglicht.

Mit Blick auf die CCS-Wertschöpfungskette fokussiert sich die Studie auf den Transport von CO<sub>2</sub> via Rohrleitungen und dessen geologischer Speicherung (Abbildung 2). Dabei wird davon ausgegangen, dass das CO<sub>2</sub> nach der Abscheidung getrocknet, gereinigt und komprimiert wird.

---

<sup>1</sup> Es ist zielführender, von der Anwendung der CCS-Technologien innerhalb eines CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkts oder Kohlenstoffmarkts zu sprechen statt eines «CCS-Markts».



**1. CO<sub>2</sub>-Abscheidung («Upstream»):** Dabei wird CO<sub>2</sub> aus Rauchgasen oder anderen Emissionen an der Quelle, bsp. in Industrieanlagen abgeschieden. Es können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Die Abscheidung ist oft der kostspieligste Teil des CCS-Prozesses. Der Aggregatzustand des CO<sub>2</sub> nach der Abscheidung ist voraussichtlich gasförmig. Das CO<sub>2</sub> wird «am Fabrikator» den Transport-Logistik-Unternehmen übergeben

**2. Transport via Rohrleitungen («Midstream»):** Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird so aufbereitet, dass es die spezifischen Anforderungen für den Transport erfüllt. Dies kann Kompression, Entwässerung und Reinigung umfassen. Je nach Rohrleitungsinfrastruktur wird das CO<sub>2</sub> verflüssigt und so in der «dichten» Phase effizient transportiert. Andere Transportmöglichkeiten über Lastwagen, Bahn, Schiff liegen ausserhalb des Studienrahmens.

**3. Injektion und Speicherung im Untergrund («Downstream»):** Das CO<sub>2</sub> wird bspw. in eine für die Schweiz typische Salzwasser führende geologische Gesteinsformation injiziert. So genannte Speicherkomplexe bestehen aus dieser Formation, die zudem mit dichtem Gestein über- und unterlagert ist. Sie werden sorgfältig ausgesucht und beobachtet, um die sichere und dauerhafte Speicherung zu gewährleisten. Die Aufsuchung, der Nachweis und die Bestimmung der Speicherkapazität, sowie der Betrieb, die Schliessung und der Rückbau der Infrastrukturanlagen erfolgen in regulierten Verfahren wie der EU CCS Richtlinie.

**Abbildung 2:** Diese Studie betrachtet die CCS-Wertschöpfungskette, wobei der Fokus auf Midstream «Transport» und Downstream «Injektion und Speicherung» liegt. Das Upstream «CO<sub>2</sub>-Abscheidung» liegt ausserhalb des Umfangs dieser Studie. Quelle: conim AG.

Um die CCS-Wertschöpfungskette funktionsfähig und effizient zu etablieren, ist eine enge zeitliche, technische und organisatorische Koordination bei der Planung und Errichtung der erforderlichen Infrastrukturen erforderlich (Abbildung 3).

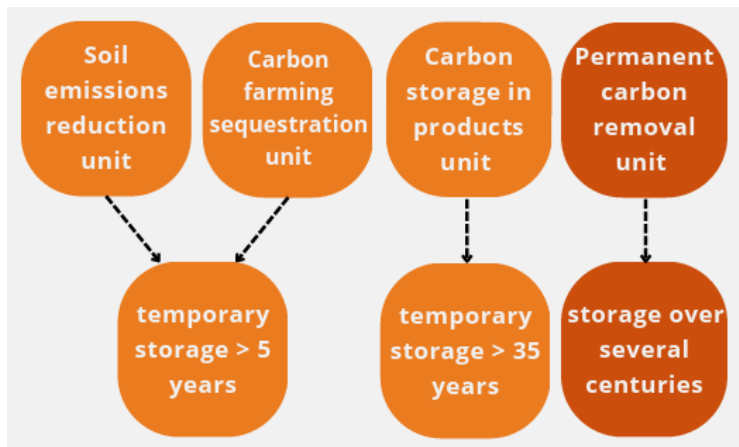
| Jahr                                   | 1                                       | 2 | 3                                                                  | 4 | 5 | 6                                | 7                                                             | 8 | 9                                                           | 10                                                                   | ... | 39 | 40 | 41         | ...                                                                  | 58 | ... | 70 |  |  |  |  |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------|---|---|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|----|----|------------|----------------------------------------------------------------------|----|-----|----|--|--|--|--|
| Geologischer CO <sub>2</sub> -Speicher | Screening / Schätzung Speicherkapazität |   | Charakterisierung und Bewertung des potenziellen Speicherkomplexes |   |   |                                  | Bau der Anlage / Erschliessung des CO <sub>2</sub> -Speichers |   |                                                             | Betrieb von geologischen CO <sub>2</sub> -Speicheranlagen (30 Jahre) |     |    |    | Schließung | Nach-Schließung / Vor-Rückgabe der Konzession/Bewilligung (30 Jahre) |    |     |    |  |  |  |  |
| CO <sub>2</sub> -Rohrleitungen         | Planung, inkl. Genehmigungen            |   |                                                                    |   |   | Bau - Ausheben, Verlegen, Testen |                                                               |   | Betrieb (mindestens 50 Jahre) -> danach Erneuerung / Ersatz |                                                                      |     |    |    |            |                                                                      |    |     |    |  |  |  |  |
| CO <sub>2</sub> -Abscheidung           |                                         |   |                                                                    |   |   |                                  |                                                               |   | X                                                           |                                                                      |     |    |    |            |                                                                      |    |     |    |  |  |  |  |

**Abbildung 3:** Die Errichtung der benötigten Infrastruktur erfordert Koordination; beim geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher werden die Lebenszyklusphasen der EU CCS Richtlinie [7] verwendet; «X» zeigt den spätesten Zeitpunkt für die Inbetriebnahme der CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen an. Quelle: conim AG.



Betreffend Marktdesign nimmt diese Studie Bezug auf die im Jahr 2024 erlassene EU-Verordnung<sup>2</sup>, die einen Unionsrahmen für die Zertifizierung von dauerhaften CO<sub>2</sub>-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landnutzung und CO<sub>2</sub>-Speicherung in Produkten schafft (Abbildung 4). Die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung führt unter Anwendung geeigneter Verfahren<sup>3</sup> zur Speicherung von CO<sub>2</sub> über mehrere Jahrhunderte und ermöglicht so die Schaffung einer zertifizierten «dauerhaften CO<sub>2</sub>-Entnahmeeinheit» («Permanent Carbon Removal Unit» in Abbildung 4).

Diese Art von Zertifikat kann als eine illustrative Weiterentwicklung der bereits heute in der Schweiz möglichen Bescheinigung einer Senkenleistung<sup>4</sup> betrachtet werden, indem der Langfristigkeit der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung, der zuverlässigen Messbarkeit, der Additionalität und der Nachhaltigkeit durch eine Preisdifferenzierung entsprechend Rechnung getragen wird.



**Abbildung 4:** Gemäss der EU Carbon Removal Certification Framework (CRCF) Verordnung [24] soll das gesamte Spektrum an Entfernungsoptionen zur Produktdifferenzierung und Preisbildung abgedeckt werden. Zertifikatskriterien schliessen 1) Langfristigkeit der Speicherung, 2) Quantifizierung / Messbarkeit, 3) Additionalität und 4) Nachhaltigkeit ein. Mit der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur können sowohl «Carbon Storage in Products Units» ermöglicht werden (z.B. CO<sub>2</sub>-Speicherung in Abbruchbeton, CO<sub>2</sub>-Bereitstellung für synthetische Treibstoffe, etc.) wie auch «Permanent Carbon Removal Units», die das Angebot eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers darstellen. Quelle: Policy Brief «CRCF Regulation» der «Negative Emissions Platform» [22].

<sup>2</sup> Verordnung (EU) 2024/3012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 zur Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO<sub>2</sub>-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Produkten [24]

<sup>3</sup> Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 [7]

<sup>4</sup> Vergleiche Verordnung über die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Verordnung) vom 30. November 2012 (Stand am 1. Januar 2026) [30]



## 1.2 Projektziele

Um die aktuellen Wissenslücken zu schliessen, verfolgt diese Studie folgende Ziele:

- Skizzen von Soll-Geschäftskonzepten für Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern
- Skizzen des Marktdesigns und der rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, inkl. Identifikation der zu bewältigenden rechtlichen Herausforderungen für den Aufbau einer umfassenden CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in der Schweiz
- Umsetzungsorientierte und politikrelevante Handlungsempfehlungen für Schlüsselakteure, d.h. für Stellen der öffentlichen Hand und für Unternehmen, die in der CCS-Wertschöpfungskette aktiv sind, die einen effizienten und schnellen Rollout der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur während der «Skalierungsphase» (2031-2050) ermöglichen

# 2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

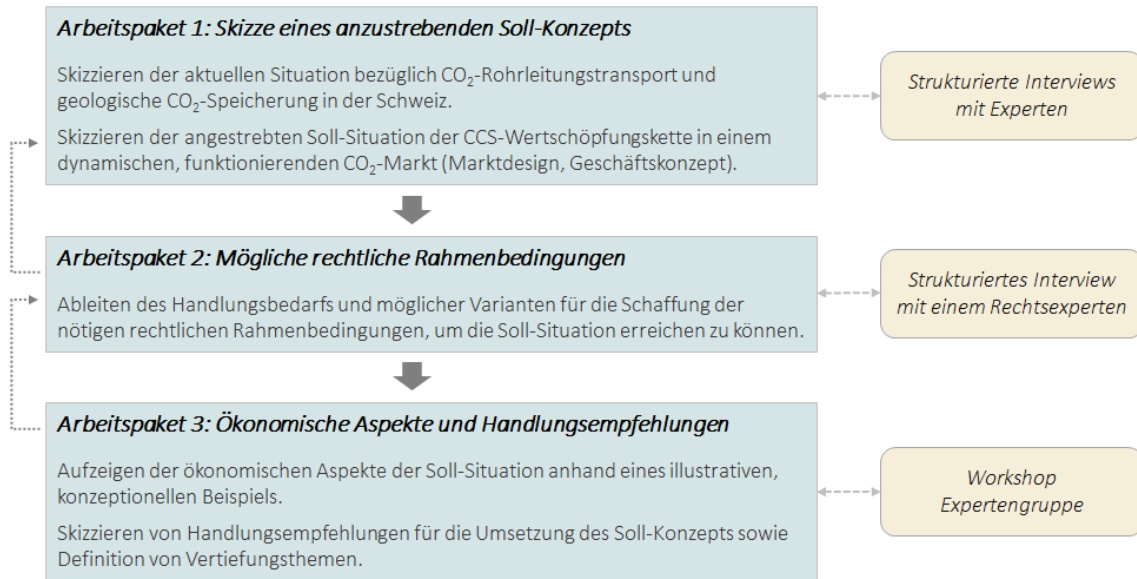
## 2.1 Vorgehen und Methode

Die Erarbeitung der Studie erfolgt in drei Arbeitspaketen (Abbildung 5):

- In Arbeitspaket 1 «Skizze eines anzustrebenden Soll-Konzepts» werden mittels Studien und Berichten und dem in Interviews gesammelten Fach- und Erfahrungswissens von Experten und ausgewählter Studienautoren folgende Elemente erarbeitet:
  - Marktdesign eines CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkts unter Berücksichtigung der monopolistischen Natur der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen, d.h. Rahmenbedingungen und Massnahmen zur Strukturierung und Regulierung des Marktes, um Effizienz, Fairness und Stabilität sicherzustellen mit dem Ziel, ökonomische und gesellschaftliche Ziele zu erreichen
  - Soll-Geschäftskonzepte für zukünftige Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern

Die Ergebnisse aus den Gesprächen werden auf der Grundlage von Studien sowie eigenem Erfahrungswissen plausibilisiert und weiter konkretisiert. Die Erkenntnisse fliessen in die Entwicklung des anzustrebenden Soll-Zustands ein.

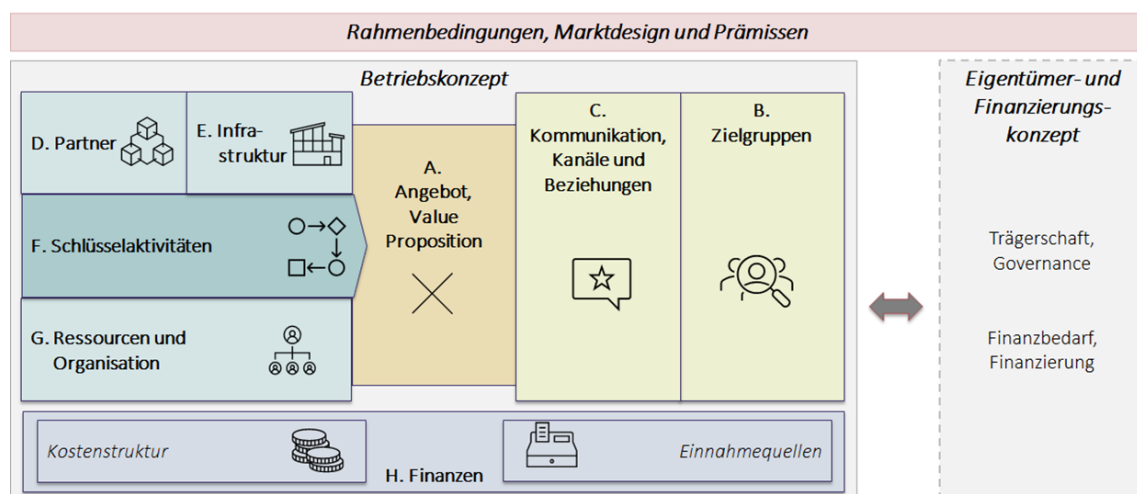
- In Arbeitspaket 2 «Mögliche rechtliche Rahmenbedingungen» wird der Rechtsrahmen für eine Schweizer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur skizziert, d.h. Gesetzgebung, Kompetenzverteilung zwischen Bund und Kantone, Genehmigungsverfahren, Beaufsichtigung, etc.
- In Arbeitspaket 3 «Ökonomische Aspekte und Handlungsempfehlungen» werden Handlungsempfehlungen basierend auf den folgenden relevanten ökonomischen Aspekten erarbeitet:
  - Investitionsbedarf für den Aufbau der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen (CAPEX)
  - Operative Kosten für einen effizienten Betrieb der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen (OPEX)



**Abbildung 5:** Die Studie wird in drei aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen erarbeitet. Quelle: conim AG.

### Anzustrebendes Soll-Konzept

Die Studie nutzt eine erweiterte Version des strategischen Instruments CANVAS (Abbildung 6). Auf Basis der Rahmenbedingungen des CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Removalmarkts werden Geschäftskonzepte (bestehend aus Betriebs-, Eigentümer- und Finanzierungskonzepten) für CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber entwickelt.



**Abbildung 6:** Darstellung der Struktur eines Geschäftskonzept von Unternehmen, die im Bereich der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen aktiv werden. Quelle: conim AG, abgeleitet von Osterwalder, A. & Pigneur, Y. (2010). Business Model Generation. [23]



Die Bausteine des Geschäftskonzepts lassen sich wie folgt beschreiben:

A. Angebot, Value Proposition: Die Produkte und Dienstleistungen, die den Kunden einen Mehrwert bieten und deren Probleme lösen oder Bedürfnisse erfüllen.

B. Zielgruppen: Die Kunden, die das Unternehmen bedienen möchte, basierend auf deren Bedürfnissen und dem Nutzen, den das Unternehmen bietet.

C. Kommunikation, Kanäle und Beziehungen: Die verschiedenen Wege, über die das Unternehmen sein Angebot zu den Kunden bringt, z.B. Vertriebskanäle oder Kommunikationsmittel sowie die Kundenbeziehungen.

D. Partner: Die strategischen und operativen Partnerschaften und Allianzen, die das Unternehmen benötigt, um Ressourcen zu beschaffen, Risiken zu reduzieren oder Effizienzen zu steigern.

E. Infrastruktur: Die wichtigsten physischen und digitalen Ressourcen, die für die Erbringung und Umsetzung des Angebots notwendig sind, sowie für den Betrieb des Unternehmens und die Erreichung der Unternehmensziele erforderlich sind.

F. Schlüsselaktivitäten: Die Aktivitäten, die das Unternehmen durchführt, um sein Geschäftskonzept erfolgreich zu implementieren.

G. Ressourcen und Organisation: Die Humanressourcen, die für die Erbringung und Umsetzung des Angebots notwendig sind.

H. Finanzen: Die Wechselwirkung zwischen einerseits Einnahmequellen (z.B. Verkaufseinnahmen, Gebühren) und der betrieblichen Kostenstruktur andererseits, die mit der Implementierung des Geschäftskonzepts verbunden sind (z.B. Betriebskosten, Investitionen).

Eigentümerkonzept: Die Eigentümerschaft und Struktur des Unternehmens. Es ist diejenige Form zu wählen, welche die skizzierten Anforderungen an das Unternehmen am besten erfüllt.

Finanzierungskonzept: Die nachhaltige Finanzierung für den Aufbau des Unternehmens und für dessen Betriebstätigkeit (inkl. Investitionen), die aus einer Mischung von Eigen- und Fremdkapital besteht.

### **Illustratives Beispiel als Grundlage für die Konzeption des Geschäftskonzepts**

Zur Veranschaulichung und zur Vereinfachung der Komplexität arbeitet die Studie mit einem illustrativen, konzeptionellen Beispiel, einem «imaginären CCS-Hub<sup>5</sup>» in der Region Bern/Solothurn (Abbildung 7) mit folgenden Elementen:

- Drei Punktemittenten<sup>6</sup>, die über eine Abscheidungsanlage und einen Anschluss an ein CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz verfügen:
  - o Kenova AG (ehemals KEBAG AG; KVA), Zuchwil (SO) mit einer erwarteten abgeschiedenen Menge von 284'165 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr
  - o Energiezentrale Forsthaus (KVA), Bern (BE) mit einer erwarteten abgeschiedenen Menge von 160'122 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr
  - o Ciments Vigier SA (Zementfabrik), Péry (BE) mit einer erwarteten abgeschiedenen Menge von 436'943 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr

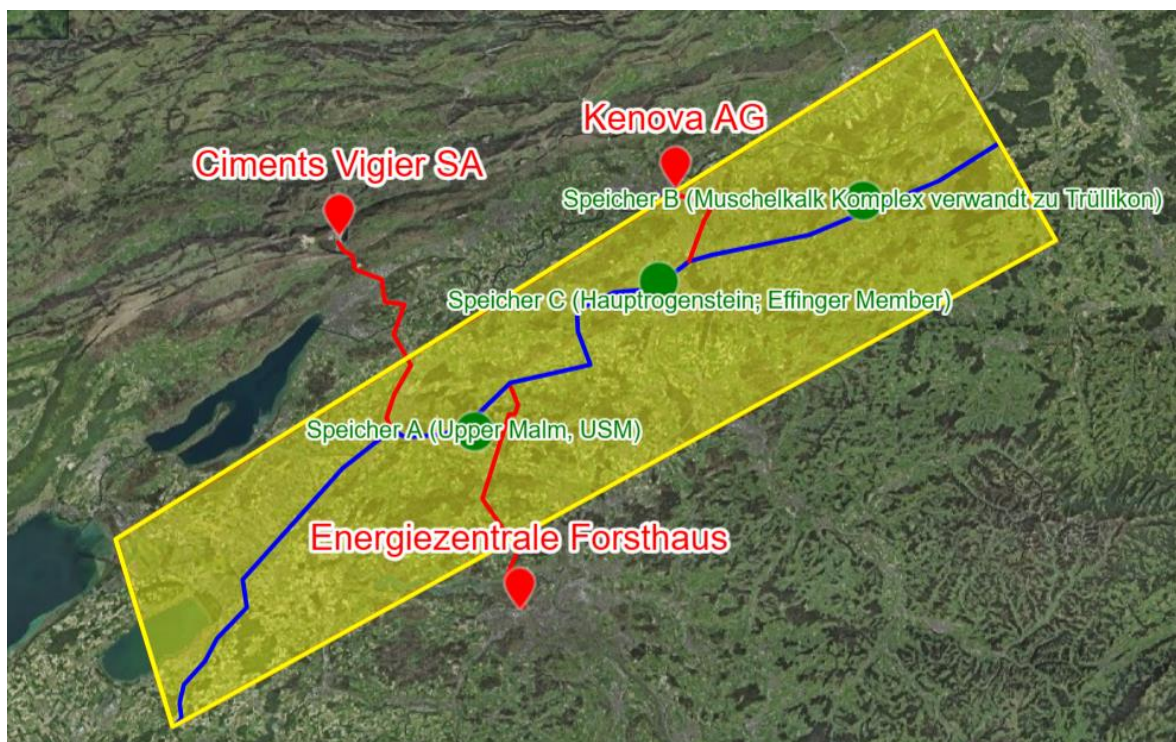
<sup>5</sup> Ein CCS-Hub verfügt über zentralisierte Transport- und Speicherinfrastrukturen, die eine Mehrzahl unterschiedlicher Emittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen bedienen.

<sup>6</sup> Geschätzter CO<sub>2</sub>-Bemessungsdurchsatz der Punktemittenten gemäss SAIPEM (2020) [6]





- Drei geologische CO<sub>2</sub>-Speicher mit je einer Betriebsdauer von 30 Jahren:
  - o CO<sub>2</sub>-Speicher A mit 400'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr im Oberen Malm-Speicherkomplex, der nach vorgängigen CO<sub>2</sub>-Speicherpiloten über eine nachgewiesene Kapazität von 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verfügt
  - o CO<sub>2</sub>-Speicher B mit 400'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr im Hauptrogenstein-Speicherkomplex, der nach vorgängigen CO<sub>2</sub>-Speicherpiloten über eine nachgewiesene Kapazität von 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verfügt
  - o CO<sub>2</sub>-Speicher C mit 200'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr im Muschelkalk-Speicherkomplex, der nach vorgängigen CO<sub>2</sub>-Speicherpiloten über eine nachgewiesene Kapazität von 6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verfügt
- CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen:
  - o ca. 80 km CO<sub>2</sub>-Hochdruckrohrleitungen (Teilstrecke der Stammstrecke WEST von SAIPEM (2020) [6]) und drei sehr kurze «Anschlüsse» zu den geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern entlang der Stammstrecke) gemäss internationalen Standards
  - o ca. 42 km CO<sub>2</sub>-Niederdruckrohrleitungen bestehend aus drei Teilstrecken von den drei Punktemittenten zur Stammstrecke WEST.



**Abbildung 7:** Der im illustrativen, konzeptionellen Beispiel verwendete «imaginäre CCS-Hub» (gelbe Fläche) mit einem Abschnitt der Stammstrecke WEST (blaue Linie), drei CO<sub>2</sub>-Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen (rote «Marker»), CO<sub>2</sub>-Niederdruckleitungen (rote Linien) und drei geologische CO<sub>2</sub>-Speichern (grüne Punkte). Darstellung der conim AG auf <https://map.geo.admin.ch>.





Folgende Annahmen liegen dem «imaginären CCS-Hub» zugrunde:

- Die jährliche Kapazität der drei geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher übersteigt die von den drei CO<sub>2</sub>-Punktemittenten abgeschiedene Menge CO<sub>2</sub> pro Jahr.
- Beim abgeschiedenen CO<sub>2</sub> wird nicht zwischen fossiler und biogener Herkunft unterschieden.
- Das gesamte von den drei CO<sub>2</sub>-Punktemittenten abgeschiedene CO<sub>2</sub> gelangt über das CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz zu den drei CO<sub>2</sub>-Speichern.<sup>7</sup>
- Das CO<sub>2</sub> erfüllt die Rohrleitungsspezifikation, sobald es in die Niederdruckrohrleitung eingespeist wird, d.h. Trocknung, Reinigung und Kompression auf das spezifizierte Druckniveau sind Sache der Emittenten.
- Weder die CO<sub>2</sub>-Hochdruck- noch die CO<sub>2</sub>-Niederdruckleitungen verfügen über Redundanz.
- Für weniger «realitätsferne» Levelized Cost of Product (LCOP; Gestehungskosten des Produkts; vgl. III Bausteine des Eigentümer- und Finanzierungskonzepts - Finanzbedarf, Finanzierung unten) wird davon ausgegangen, dass die Stammstrecke WEST analog zur SAIPEM (2020) [6] eine Kapazität hat, die den Transport von 3.9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr erlaubt.
- Nachdem das Bern-Solothurn Segment der Stammstrecke WEST gebaut wurde (rund 1/3 der Gesamtlänge der Stammstrecke WEST von Basel (BS) bis Collombey (VS)), füllt sich die nicht vom CCS-Hub Bern-Solothurn benötigte Kapazität zunehmend mit von weiteren Punktemittenten abgeschiedenem CO<sub>2</sub>. Diese «übrige» verfügbare Kapazität beträgt rund 3 Millionen Tonnen. Sie wird über einen Zeitraum von 30 Jahren ausgefüllt, wobei der Zuwachs rund 100'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr beträgt, was eine eher konservative Annahme darstellt.
- Bezüglich des Einspeiseindex wird Folgendes angenommen: Pro MPa Einspeisedruck werden 1-2 kg pro Sekunde CO<sub>2</sub> eingespeist. Zum Vergleich ist dieser Indexwert nur ein Bruchteil dessen, was mit 10-20 kg/s pro MPa im Geothermieprojekt Riehen (BS) im Muschelkalk beobachtet wird. Daher wird im vorliegenden Beispiel pro Bohrloch bei einem Einspeisedruck von 3 MPa rund 3-6 kg pro Sekunde oder 100'000 – 200'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr in den Speicherhorizont eingespeist.
- Es wird gemäss der EU CCS Richtlinie [7] ein Standard-MMV (Measurement, Monitoring and Verification) Programm durchgeführt, um in erster Linie bei geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern «Compliance, Conformance and Regularity» zu demonstrieren nachzuweisen.

## 2.2 Ergebnis

In den nachfolgenden Abschnitten werden jeweils der Ist- und der Soll-Zustand der Rahmenbedingungen (I.), der Bausteine des Betriebskonzepts (II.) und der Bausteine des Eigentümer- und Finanzierungskonzepts (III.) für Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber beschrieben wie sie in **Abbildung 6** dargestellt sind. Im Abschnitt «Finanzbedarf, Finanzierung» wird das illustrative, konzeptionelle Beispiel eines «imaginären CCS-Hub» in der Region Bern/Solothurn verwendet. Bei den Berechnungen in dieser Studie handelt es sich um Kostenschätzungen der Klasse 5, d.h. die tatsächlichen Kosten können um 20% bis 50% tiefer oder um 30% bis 100% höher liegen. Die Ergebnisse dienen lediglich der Illustration. Siehe «i Einleitung» in Anhang II «Finanztechnische Details»

<sup>7</sup> Es wird empfohlen, dass in einem zukünftigen System auch eine CO<sub>2</sub>-Anlieferung mittels Lastwagen oder Bahn möglich ist. Ausserdem sollte das zukünftige CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz sowohl über «Inlets» für die Einspeisung von CO<sub>2</sub> (z.B. von Direct Air Capture-Betreibern wie Climeworks) als auch über «Outlets» für die Entnahme von CO<sub>2</sub> (z.B. von Unternehmen wie Neustark, die CO<sub>2</sub> in ihren industriellen Prozessen verwenden) verfügen.



für mehr Informationen zu Kostenschätzungen gemäss AACE International Recommended Practice No. 87R-14. [8] Zur besseren Unterscheidung wird der Ist-Zustand jeweils kursiv dargestellt.

## I. Rahmenbedingungen

### Ist-Zustand

*Folgendes sind die vier zentralen Erkenntnisse aus den durchgeführten Interviews:*

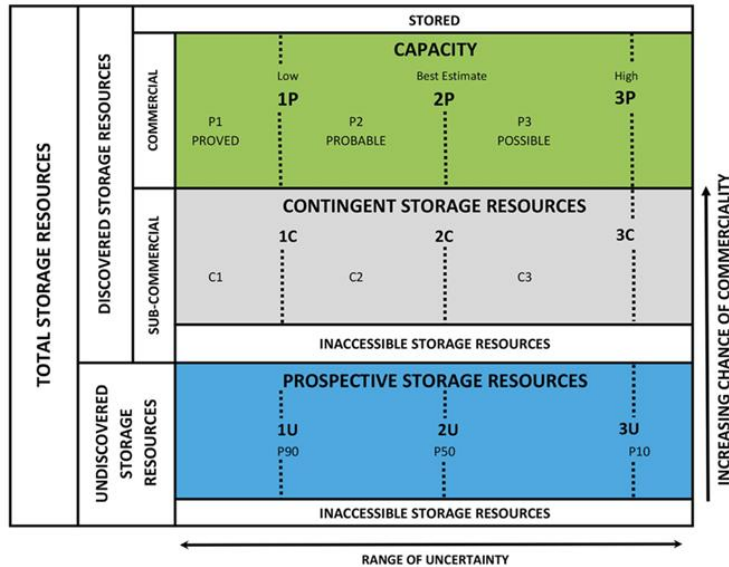
- *Das Bewusstsein für geeignete Rahmenbedingungen auf den Kohlenstoffmarkt ist derzeit noch gering – vor allem Ökonomen erkennen den Bedarf an Produkten wie etwa «Permanent Carbon Removal Units» (PCRUs; vgl. Abbildung 4), die den Einsatz von CCS-Technologien im Kohlenstoffmarkt dienlich sein können.*
- *Ein liberaler Kohlenstoffmarkt gemäss Ansätzen aus liberalisierten Energiemärkten (z.B. in der EU) wird von mehreren Gesprächspartnern kurz- und mittelfristig als wenig hilfreich eingeschätzt. Stattdessen wird die Entwicklung regulierter, staatlich gesteuerter Märkte als eine realisierbare Option erachtet.*
- *Bei der Ausgestaltung gesetzlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen für CCS kann das bestehende Rohrleitungsgesetz (anwendbar auf Brenn- und Treibstoffe) – einschliesslich seiner Vollzugsmechanismen – als Orientierungsrahmen dienen.*
- *Die kantonalen Gesetzgebungen bieten grundsätzlich einen rechtlichen und regulatorischen Rahmen für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung. Allerdings stellt die Fragmentierung in 26 kantonale Zuständigkeiten ein erhebliches Hindernis für einen effizienten und koordinierten Vollzug dar.*

*Zudem ist es aufgrund der hohen irreversiblen Kosten («sunk costs») und der Notwendigkeit, eine kritische Menge an abgeschiedenem CO<sub>2</sub> in der geplanten Rohrleitungsinfrastruktur zu sammeln und zu transportieren, schwierig, industrielle Akteure für die Investitionen in die Planung, Entwicklung, Bau und Betrieb von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Seichern zu gewinnen. Viele Akteure bewerten die ökonomischen und kommerziellen Risiken momentan als zu hoch.*

*Des Weiteren stellt der Vollzug der Gesetze ein grosses Hindernis dar, während in einzelnen Kantonen gesetzliche Rahmenbedingungen für die Bewilligung und Konzessionierung von geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherprojekten existieren. Zusätzlich zu den ökonomischen und kommerziellen Risiken kommt bei den geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern die Herausforderung hinzu, prospektive Speicherressourcen vor dem Hintergrund einer diesbezüglich unerkundeten Schweiz in nachgewiesene Speicherkapazitäten zu entwickeln. Bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung wurden in der Schweiz lediglich sogenannte «undiscovered storage resources» bestimmt (Abbildung 8). Nach heutigem Wissensstand von Chevalier et al. (2010) [9] und Giardini et al. (2021) [10] beträgt das von den Autoren so bezeichnete «Speicherpotenzial» 2'700 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, das aber formell als «3U» oder «P10» der «undiscovered storage resources»<sup>8</sup> einzustufen ist. Des Weiteren ist abgeschiedenes CO<sub>2</sub>, das im Untergrund gespeichert werden soll, in der Schweiz aktuell nicht vom Abfallrecht ausgenommen. [11]*

---

<sup>8</sup> P90, P50 und P10 sind statistische Perzentile, die verwendet werden, um die Bandbreite möglicher Ergebnisse einer Simulation oder eines Modells zu beschreiben, wobei P90 eine konservative Schätzung, P50 der Median und P10 eine optimistische Schätzung darstellt. Konkret bedeutet P90, dass 90 % der Ergebnisse diesen Wert erreichen oder überschreiten, P50 ist der Mittelwert (Median) mit 50 % darüber und 50 % darunter, und P10 bedeutet, dass nur 10 % der Ergebnisse voraussichtlich besser als dieser Wert sein werden. Diese Begriffe werden häufig verwendet, um Unsicherheiten in Bereichen wie Geologie und Projektmanagement zu quantifizieren und zu kommunizieren.



**Abbildung 8:** Rahmen für die Klassifizierung von CO<sub>2</sub>-Speicherressourcen gemäss Industrieverbänden (Society of Petroleum Engineers (SPE), the World Petroleum Council (WPC), Society of Exploration Geophysicists (SEG), the Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE), Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA), and the European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE)). Der Rahmen wurde in Anlehnung an das SPE Petroleum Resources Management System entwickelt und ist ebenfalls abgestimmt mit dem United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) UNFC-2009 Klassifizierungssystem, das ebenso geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung adressiert (Supplementary Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources (Update 2019) to Injection Projects for the Purpose of Geological Storage). Quelle: CO<sub>2</sub> Storage Resources Management System (2017) [27]

Ferner verzeichnen die Integration und Anwendung von CCS-Technologien bislang nur sehr begrenzte Erfolge – sowohl in den Compliance-Märkten (z.B. im schweizerischen Emissionshandelssystem, EHS) als auch im freiwilligen Kohlenstoffmarkt (Voluntary Carbon Market, VCM). In der Folge besteht derzeit weder ein marktrelevantes Angebot für noch eine Nachfrage nach den dafür notwendigen physischen Infrastrukturen, insbesondere CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten.

Dem EHS liegt konzeptionell der Fokus auf der Emissionsminderung an der Quelle zugrunde. Die für die Vermeidung und dauerhafte Entfernung von CO<sub>2</sub> erforderliche Infrastruktur tritt dabei in den Hintergrund, da gegenwärtig zahlreiche «low-hanging fruits» existieren – also einfacher umsetzbare, kostengünstigere und kurzfristig verfügbare Massnahmen, die den Einsatz von CCS-Technologien vorerst weniger attraktiv erscheinen lassen.

Grundsätzlich ist der Einsatz von CCS-Technologien machbar und kann entsprechend dem CO<sub>2</sub>-Gesetz [12] für fossile EHS Quellen als Emissionsminderung dienen. In der praktischen Umsetzung zeigen sich jedoch erhebliche Hemmnisse:

- Die historischen Preise im EHS waren bislang nicht nur zu niedrig, sondern auch volatil und durch eine mangelnde Preisstabilität geprägt.
- Die hohe Kapitalintensität sowie die langfristige Ausrichtung der für den Einsatz von CCS-Technologien notwendigen Infrastrukturprojekte – mit Laufzeiten von mindestens 20 bis 40 Jahren – erfordern den Einsatz privaten Kapitals, das entsprechend hohe Renditeerwartungen hat.



- *Die bestehenden Marktmechanismen generieren derzeit nur für einen Teil der Wertschöpfungskette Erträge – in der Regel für das Unternehmen, das CO<sub>2</sub> abscheidet und somit die Emissionen reduziert. Unklar bleibt hingegen, wie die nachgelagerten Aktivitäten – insbesondere Transport und Speicherung – wirtschaftlich berücksichtigt werden können, da Emittenten und Abscheider meist nicht in diesen Bereichen tätig sind.*

*Diese Hemmnisse führen zu erheblichen technischen, ökonomischen, kommerziellen und organisatorischen Risiken für die der CO<sub>2</sub>-Abscheidung nachgelagerten Glieder der Wertschöpfungskette und erschweren somit den Aufbau einer funktionsfähigen CCS-Infrastruktur.*

### **Soll-Zustand**

Aus den Erkenntnissen der Erhebung der aktuellen Rahmenbedingungen und den Zielen der Klimastrategie des Bundes wurde das aus Sicht der Autoren anzustrebende Soll-Zustand in Bezug auf Marktdesign und Geschäftskonzept entwickelt.

#### **Marktdesign:**

Für das Marktdesign und die Weiterentwicklung des Kohlenstoffmarkts ist es entscheidend, Anreize zu schaffen, damit die Aktivitäten der Abscheidung, des Transports und der Speicherung von CO<sub>2</sub> von kompetenten und effizienten Marktteilnehmern übernommen werden. Dies ermöglicht eine Zusammenarbeit von Akteuren mit unterschiedlichen Stärken und Risikobereitschaften beim Einsatz von CCS-Technologien entlang der Wertschöpfungskette.

Die Anzahl der Emittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen wird überschaubar sein: In der Schweiz gibt es rund 30 grosse Emittenten, die in Zukunft zwischen 100'000 und 500'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr abscheiden können. Sollte sich ein CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz ähnlich wie das Erdgasrohrleitungsnetz in der Schweiz entwickeln, wäre mit einer tiefen, einstelligen Anzahl von Rohrleitungsbetreibern zu rechnen – nicht zuletzt aufgrund von Skaleneffekten, die die Kosten senken. Ebenso wäre die Anzahl der Betreiber von geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern sehr begrenzt. Butti et al. (2024) [5] gehen von etwa fünf bis zehn geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern aus, die die angestrebten 2 bis 3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr dauerhaft speichern.

Ab der Mitte der 2030er Jahre gibt keine kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten mehr, d.h. alle Emittenten sind verpflichtet, Rechte zu erwerben, um CO<sub>2</sub> ausstossen zu dürfen. Damit ein Anreiz besteht, CO<sub>2</sub> abzuscheiden und langfristig zu speichern, sollten die Kosten für die Errichtung und den Betrieb einer CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage, für den Transport und für die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> tiefer liegen als der Preis für das Recht, CO<sub>2</sub> auszustossen.

CO<sub>2</sub>-Abscheider, d.h. Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Technologien, können sich entweder für die Verwendung des CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes und der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher entscheiden oder auf alternative Lösungen zurückzugreifen. Dazu zählen der CO<sub>2</sub>-Transport per Bahn, Lastwagen oder Schiff sowie dessen Speicherung in Baumaterialien, chemischen Produkten (z.B. Kunststoffe) und Ähnlichem. Somit stehen sowohl das CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz als auch die geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher in einem gewissen Wettbewerb mit diesen Alternativen. Diese erreichen jedoch nicht vergleichbare Transport- und Speichermengen von CO<sub>2</sub>.

Sowohl die Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen als auch die Betreiber geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher gewährleisten Dritten diskriminierungsfreien Zugang zu ihren Infrastrukturen («Third Party Access»), wobei die Preise transparent und bekannt sind. Sie sind zudem verpflichtet, ihre Infrastrukturen auszubauen, wenn es sich abzeichnet, dass die vorhandenen Kapazitäten überschritten werden. Vergleiche Anhang I «Rechtliche Aspekte».



Das Marktdesign der CCS-Wertschöpfungskette wirkt sich auch auf andere Wertschöpfungsketten aus. Deshalb sollte sichergestellt werden, dass kein «Waterbed Effect» eintritt, d.h. eine Emissionsminderung in einem Bereich darf nicht zu einer Emissionserhöhung in einem anderen Bereich führen.

Die geführten Expertengespräche und gewonnenen Erkenntnissen legen nahe, die Erwartung an einen dynamischen Markt insofern zu relativieren, als der Wettbewerb primär darauf abzielt, eine volkswirtschaftlich optimale Infrastrukturkonfiguration zu erreichen, um die Klimaziele möglichst kostengünstig zu erfüllen:

- Der Fokus auf eine kostenorientierte, volkswirtschaftliche Optimierung lässt nur begrenzten Spielraum für hohe Profite zu, zumal die monopolistische Marktstruktur eine starke Marktaufsichtsbehörde erfordert, die Transparenz sicherstellt und die Einhaltung der Marktregeln überwacht.
- Nichtsdestotrotz sind langfristig stabile, wenn auch moderate Renditen für bestimmte Anleger und Investoren durchaus attraktiv. Der Wettbewerb kann sich zudem über Ausschreibungen für Speicherkonzessionen oder für regionale, jedoch national gut integrierte Segmente der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur entfalten.

Daraus ergeben sich Konsequenzen für förderliche Rahmenbedingungen, die im Folgenden beschreiben. Siehe auch Anhang I «Rechtliche Aspekte».

#### Gesetzliche Rahmenbedingungen:

Das klimapolitische Netto-Null-Ziel der Schweiz ähnelt dem der EU. Die zu erwartende physische enge Verknüpfung mit und der schweizerische Bedarf an Zugang und Nutzung der europäischen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen sowie die Integration in den europäischen Kohlenstoffmarkt legen einen autonomen Nachvollzug an europäische Rahmenbedingungen nahe. Die Entstehung eines Kohlenstoffmarktes setzt voraus, dass CO<sub>2</sub> als handelbares Gut qualifiziert wird, sowie fungibel (d.h. nach Mass, Zahl oder Gewicht austauschbar) und rechtssicher übertragbar ist. Diese Kommodifizierung bedingt eine Ausnahme vom Abfallrecht, was im gewählten illustrativen Beispiel berücksichtigt ist.

Den wettbewerbsrechtlichen Problemstellungen, die sich aus dem Charakter eines natürlichen Monopols bei CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur ergeben, kann durch eine proaktive Sektorregulierung begegnet werden. Diese geht über das Kartellrecht hinaus und klärt die zentralen Fragen des Zugangs *ex ante*: Insbesondere legt die Regulierung die Kriterien für einen diskriminierungsfreien Netzzugang verbindlich fest und sieht die Schaffung einer starken, unabhängigen Regulierungsbehörde (analog zur ElCom) zur Überwachung und Durchsetzung dieser Regeln vor. Siehe weiterführende Erläuterungen in Anhang I «Rechtliche Aspekte». Auch benötigt es eine kompetente staatlich kontrollierte, technische Aufsicht – analog zum Eidgenössischen Rohrleitungsinspektorat. Teilbereiche (z.B. Niederdruckleitungen) könnten bei den Kantonen beziehungsweise von Kantonen beauftragte Organisationen wie dem Fachverband für Wasser, Gas und Wärme (SVGW) übertragen werden.

Ein übergeordnetes, vom Bund gesteuerte Planungsinstrument ist sinnvoll für den Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur. Insbesondere zwei spezifisch ausgestaltete Sachplan-Instrumente sollen festgesetzt werden: Ein Sachplan für das nationale CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz sowie ein Sachplan für die Sicherung geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher. Diese Sachpläne sollen in einem formellen Gesetz verankert werden. Eine entsprechende kantonale Richtplanung überführt die Vorgaben des Bundes aus den Sachplänen in verbindliches Recht.

Abschliessend sei erwähnt, dass die wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, soweit sinnvoll, auf alle Arten des CO<sub>2</sub>-Transports und alle Arten der CO<sub>2</sub>-Speicherung und assoziierte Technologien anwendbar sein sollen.



## II. Bausteine des Betriebskonzepts:

Nachfolgend wird pro Baustein des Betriebskonzept der Ist-Zustand einem anzustrebenden Soll-Zustand gegenübergestellt.

### A. Angebot und Value Proposition (Wertversprechen)

Das Angebot umfasst alle Produkte und Dienstleistungen eines CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers, die dazu dienen, die Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Das Wertversprechen eines Unternehmens beschreibt den Mehrwert, den es seinen Kunden bietet, und durch den es sich von seinen Mitbewerbern unterscheidet. Dieser Mehrwert kann sich aus verschiedenen Elementen zusammensetzen – etwa Neuheit, Leistung, Individualisierung, «Erfüllung der Aufgabe», Design, Marke/Status, Preis, Kostensenkung, Risikominderung, Zugänglichkeit oder Benutzerfreundlichkeit. Wertversprechen können sowohl qualitativer als auch quantitativer Art sein – etwa in Bezug auf den Erfolg, die Kostenstruktur, den Preis oder die Effizienz bei der Aufsuchung, Entwicklung und dem Betrieb geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher.

#### Ist-Zustand:

*Die Interviewpartner im Bereich der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** haben unterschiedliche Angebotskonzepte und Wertversprechen gegenüber ihren potenziellen Kunden. Einerseits positionieren sich einige Akteure als Logistiker, die das CO<sub>2</sub> ab «Fabrikator» zum geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher transportieren – unabhängig vom Transportmodus (Lastwagen, Bahn, Schiff, Rohrleitung). Andere Akteure hingegen berufen sich auf ihre Kernkompetenzen und positionieren sich als verlässliche und erfahrene Entwickler und Betreiber regionaler Rohrleitungsnetze, die sich am bestehenden Schweizer Erdgasnetz orientieren. Sie erweitern ihre Geschäftsfelder gezielt um den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport – in Analogie zu den aktuellen Entwicklungen im Bereich des Wasserstofftransports.*

*Im Bereich der **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung** und des damit verbundenen Lebenszyklus eines CO<sub>2</sub>-Speichers konzentrieren sich die Interviewpartner auf die Frühphasen, insbesondere auf das sogenannte «Screening» und die regionale Bewertung der Speicherressourcen. Sofern die Finanzierbarkeit gewährleistet ist, folgt gegebenenfalls die Charakterisierung und detaillierte Bewertung eines konkreten Speicherkomplexes. In der Schweiz gibt es derzeit kein Unternehmen, das über ein Angebotskonzept oder ein Wertversprechen in Bezug auf die Erschliessung von CO<sub>2</sub>-Speichern, deren Betrieb sowie die Nachsorgeüberwachung bis zum Heimfall verfügt.*

#### Soll-Zustand:

Artikel 3, Absatz 5 des Klima- und Innovationsgesetz besagt, dass der Bund und die Kantone im Rahmen ihrer Zuständigkeiten dafür sorgen, dass spätestens bis 2050 in der Schweiz und im Ausland Kohlenstoffspeicher im notwendigen Umfang für die Erreichung des Netto-Null-Ziels zur Verfügung stehen. [1] Auch wenn vermutlich inländische geologische CO<sub>2</sub>-Speicher im Vergleich zu ausländischen bescheidenere CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten haben, tragen sie doch dazu bei, einheimische Lösungen bereitzustellen und die Abhängigkeit vom Ausland zu reduzieren. CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen sind ein zentrales Element, damit in Zukunft das in der Schweiz abgeschiedene CO<sub>2</sub> zu geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern transportiert werden kann – sei es im Inland oder im Ausland.

Entwickler und Betreiber von **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastrukturen** bauen auf der Tatsache auf, dass der Transport von CO<sub>2</sub> im Ausland seit den 1970er-Jahren sicher und zuverlässig über weite Distanzen per Rohrleitung erfolgt. [13] Sie gewährleisten ihren Abnehmern (z. B. Betreibern geologischer





CO<sub>2</sub>-Speicher) und Lieferanten (z. B. CO<sub>2</sub>-Abscheidern) einen regelkonformen Bau und Betrieb der Leitungen – teils sogar über die regulatorischen Anforderungen hinaus. Sie stellen jederzeit ausreichend Transportkapazitäten zur Verfügung, um die bestehende Nachfrage zu decken, und sind zudem in der Lage, durch den Ausbau der Infrastruktur auch zukünftigen Bedarf abzudecken. Im Vergleich mit anderen Transportmodi stellt der Rohrleitungstransport die wirtschaftlich attraktivste Option dar. [14]

Entwickler und Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastrukturen stellen klare Anforderungen an die Qualität und Reinheit des CO<sub>2</sub>-Stroms, der vom Abscheider abgenommen wird. Auf Gesuch des Abscheiders oder regionalen Abscheiderverbänden stellen sie, sofern aus technischen, ökonomischen und kommerziellen Gründen sinnvoll, Sammelinfrastrukturen (d.h. Niederdruckrohrleitungen zur Verknüpfung an Hochdruckstammstrecken) zur Verfügung und übernehmen gewisse Behandlungsschritte (z.B. Trocknung, Reinigung, Kompression) für die notwendige Qualitätssicherung des CO<sub>2</sub>-Stroms. Da das Schweizer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz über Anschlüsse an das internationale CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz verfügt, stellen dessen Betreiber Kapazitäten für den internationalen CO<sub>2</sub>-Transit zur Verfügung.

CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber verfügen zudem über ein entsprechendes Eich- und Messwesen, das eine präzise und rechtskonforme Fiskalmessung ermöglicht. Sie nehmen das CO<sub>2</sub> und die damit verbundenen Rechte und Pflichten in Besitz und übergeben sie dann den Abnehmern, z.B. an die Betreiber der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher.

Betreiber von **geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern** bieten «zertifizierte CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten» in der Schweiz in der Form von PCRU-Zertifikaten an. Die Anzahl verfügbarer Zertifikate richtet sich nach den jährlich verfügbaren zertifizierten geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten. CO<sub>2</sub>-Abscheider erwerben die PCRU-Zertifikate, wenn sie planen «ihr» CO<sub>2</sub> geologisch in der Schweiz zu speichern.

Die PCRU-Zertifikate werden auf einer CO<sub>2</sub>-Handelsplattform angeboten. Diese dient als Verkaufsstelle für die Zertifikate mehrerer CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber an CO<sub>2</sub>-Abscheider. Dadurch wird die Marktaufsicht im Vergleich zu zahlreichen bilateralen Geschäftsbeziehungen erleichtert. Tabelle 1 fasst die sich ergänzenden Angebote von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber zusammen.

**Tabelle 1:** Übersicht der Angebote von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern

| <b>CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– Kapazität in CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen (Haupt- und Nebenleitungen)</li><li>– Sammelinfrastrukturen, d.h. Niederdruckrohrleitungen zur Verknüpfung an Hochdruckstammstrecken</li><li>– CO<sub>2</sub>-Behandlung: Trocknung, Reinigung und Kompression für die notwendige Qualitätssicherung des CO<sub>2</sub>-Stroms auf Gesuch der Abscheider</li><li>– Anschluss an das internationale CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Zertifizierte geologische CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität in der Schweiz</li><li>– Zugehörige «PCRU»-Zertifikate können CO<sub>2</sub>-Abscheidern für CO<sub>2</sub>, das in der Schweiz geologisch gespeichert werden soll, erworben werden</li><li>– Die Anzahl verfügbarer Zertifikate richtet sich nach der jährlich verfügbaren zertifizierten geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität</li></ul> |



#### **Exkurs:**

*Im Laufe der Umwandlung prospektiver Speicherressourcen in nutzbare Speicherkapazitäten (vgl. Abbildung 8) kann ein ökonomischer Mehrwert erzielt werden: Entwickler von geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern können einen monetären Wert aus Beteiligungen oder Übernahmen von kantonal genehmigten Explorationsfeldern und/oder Konzessionsgebieten ziehen. So kann ein Angebotskonzept und Wertversprechen der Entwickler auf der Ausführung von wert- und informationssteigernden Arbeiten beruhen, die zu einer Umwandlung beitragen: Beispielsweise werden Prospektions- und Explorationsarbeiten vorgenommen mit dem Ziel, die Speicherkapazität nachzuweisen und die Speicherkapazität eines identifizierten Speicherkomplexes zu bestimmen. Diese Vorarbeiten umfassen die CO<sub>2</sub>-Speicher-Lebenszyklusphasen «Screening und regionale Bewertung der Speicherressourcen» und die «Charakterisierung und Bewertung des Speicherkomplexes» (vgl. Abbildung 3).*

## **B. Zielgruppen (Kunden)**

Zielgruppen umfassen Kundensegmente, deren spezifische Bedürfnisse durch massgeschneiderte Angebote, Vertriebswege und Kundenbeziehungsmanagement von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern adressiert werden.

#### **Ist-Zustand:**

*Die Interviewpartner im Bereich der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** haben grundsätzlich Vorstellungen zur Kundenidentifikation, wobei der primäre Fokus auf den Emittenten liegt. Im Bereich der **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung** erfolgt die Zielgruppenbestimmung ebenfalls noch auf einer allgemeinen Ebene. Dies entspricht dem aktuellen Status im Lebenszyklus geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher, da bislang kein Unternehmen oder keine Behörde – einschliesslich des geologischen Landesdienstes swisstopo – mit Phase I «Abschätzung der Speicherkapazität» begonnen hat.*

#### **Soll-Zustand:**

Die einheimischen Kundensegmente, die von Betreibern der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** für die direkte physische Einspeisung bedient werden, sind begrenzt, klar identifizierbar und zählbar: CO<sub>2</sub>-Punktemittenten wie KVAs, Zementhersteller, die chemische Industrie, Biogasanlagen und evtl. Bio-Raffinerien, die über eine CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage verfügen. Weitere Kunden sind ausländische CO<sub>2</sub>-Punktemittenten, die das abgeschiedene CO<sub>2</sub> in der Schweiz geologisch speichern oder es via Schweiz zu einer geologischen Speicherstätte in einem Drittland schicken möchten, und Betreiber von DAC-Technologien im In- und Ausland.

Die Kunden der **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber** sind die gleichen wie die Kunden der Betreiber der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur, d.h. inländische und ausländische CO<sub>2</sub>-Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Technologien. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> kann dabei via Rohrleitungsinfrastruktur oder auch Bahn, Lastwagen oder Schiff zu ihnen gelangen.

Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die Kunden von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern.



**Tabelle 2:** Übersicht über Kunden von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern

| CO <sub>2</sub> -Rohrleitungsbetreiber                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Geologische CO <sub>2</sub> -Speicherbetreiber                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– Inländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport zu einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherstätte in der Schweiz liefern lassen</li><li>– Ausländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport zu einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherstätte in der Schweiz liefern lassen (ENTER)</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"><li>– Inländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport zu einer «alternativen» CO<sub>2</sub>-Speicherung (Carbon Capture and Utilisation (CCU), d.h. nicht geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung) liefern lassen</li><li>– Inländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport ins benachbarte Ausland schicken (EXIT)</li><li>– Ausländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport durch die Schweiz in ein Drittland schicken (TRANSIT)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Inländische und ausländische Punktemittenten mit Abscheidungsanlagen und Betreiber von Anlagen, die ihr CO<sub>2</sub> «alternativ» (d.h. nicht via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport) zu einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherstätte in der Schweiz liefern</li></ul> |

### C. Kommunikation, Kanäle und Beziehungen zu Kunden

Kanäle sind die Schnittstellen, über die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber mit ihren Kundensegmenten kommunizieren, sie erreichen und ihr Wertversprechen übermitteln. Sie bilden die Brücke zum Kunden und umfassen Bereiche wie Marketing, Vertrieb, Kommunikation und After-Sales-Services.

#### Ist-Zustand:

Die Interviewpartner im Bereich der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** sehen CO<sub>2</sub>-Emittenten mit Abscheidungsanlagen als ihre primären Kunden. Es gibt bereits einen Austausch zwischen CO<sub>2</sub>-Emittenten und zukünftigen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreibern auf lokaler Ebene sowie erste Gespräche mit europäischen Rohrleitungsbetreibern (z.B. Deutschland / Open Grid Europe GmbH). Aufgrund einer möglichen Rolle als CO<sub>2</sub>-Transportlogistiker sehen sich einzelne Rohrleitungsbetreiber als potenzielle Plattform für die Vernetzung von CO<sub>2</sub>-Transport mittels Rohrleitungen, Schiffe, Bahn und Lastwagen und können so über Emittenten mit Rohrleitungsanschluss hinaus, weitere Emittenten als Kunden gewinnen.

Da der «Emittenten-seitige» Kundenkreis sehr begrenzt ist – es gibt in der Schweiz rund 30 Punktemittenten, die rund 100'000 bis 500'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr ausstossen – sind entsprechend die Kommunikationskanäle überschaubar. Fachveranstaltungen, Fachkongresse, Branchentagungen und wiederkehrende Medienpräsenzen zeigen sich hier als effektive Kommunikationskanäle. Die «key messages» sind nicht eindeutig abrufbar und aufgrund des Fehlens auch nur sehr kleiner, realisierter Rohrleitungsprojekte entsprechend vage.

Der Ausblick der einheimischen **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung** ist derzeit von einem hohen Unwissensstand geprägt. Einerseits ist das Schweizer Mittelland von einem grundsätzlich favorablen



*Sedimentbecken vom Bodensee zum Lac Léman unterlegt, jedoch sind noch keine Speicherkapazitäten nachgewiesen worden. Kommt hinzu, dass die prospektiven Speicherressourcen (vgl. Abbildung 8) anhand von teilweise ungeeigneten Grundlagendaten abgeschätzt worden sind. Der unreife Wissensstand und die Verwechslung von prospektiven Speicherressourcen und nachgewiesener Speicherkapazität veranlasst Akteure oftmals von «keinen» geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherressourcen» zu sprechen.*

### **Soll-Zustand:**

Da der Kreis der Zielgruppen und die entsprechenden Kundenkreise von Betreibern der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** und **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern** sehr begrenzt sind und bleiben, werden bestehende Kanäle und Beziehungen gefestigt.

Die Kanäle umfassen:

- Fachveranstaltungen (z.B. im Rahmen der Klimapolitik des Bundes)
- Branchentagungen (z.B. Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA), Verband der Schweizerischen Cementindustrie (cemsuisse), weitere Branchenorganisationen)
- Von der Bundes- und Kantonalverwaltung eingesetzte Arbeitsgruppen
- Swiss Carbon Removal Plattform

Effiziente und transparente Kommunikation zwischen den einzelnen Elementen der CCS-Wertschöpfungskette (CO<sub>2</sub>-Abscheider, CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherentwickler und -betreiber) werden notwendig, um die Transport- und Speicherinfrastrukturen bedarfsgerecht und zukunftsorientiert bereitzustellen. So soll z.B. frühe Kenntnis über die «Pipeline» von Prospektion über Erschliessung und Betrieb zukünftiger CO<sub>2</sub>-Speicher eine solide Grundlage für den Bau und die Expansion des CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes bilden.

## **D. Partner**

CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber stützen sich auf ein Netzwerk externer Lieferanten und Partner, das ihnen ermöglicht, Kosten zu optimieren, Risiken zu minimieren und Zugang zu zusätzlichen, komplementären Ressourcen zu erhalten.

### **Ist-Zustand:**

*Die Interviewpartner im Bereich der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** sehen strategische und nicht-wettbewerbliche, kartellrechtkonforme Partnerschaften mit Emittenten in der Anfangs- und Aufbau-phase einer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur als einen wichtigen Schlüssel zu einer erfolgreichen Realisierung. Von strategischen Partnerschaften mit potenziellen Wettbewerbern wird abgesehen. In welchem Masse Joint Ventures zwischen Emittenten und Rohrleitungsbetreibern sowie geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherentwicklern und -betreibern verfolgt werden, ist heute unklar. Jedoch wird sehr grossen Wert auf solide und dauerhafte Beziehungen zu Dienstleistern, insbesondere für Planungs- und Ingenieurarbeiten, sowie mit Original Equipment Manufacturer (OEM; Erstausrüstern) gelegt. Kooperationen mit Betreibern von geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen beschränken sich auf ausländische Betreiber mit Anlagen unter der Nordsee und Onshore Dänemark; potenzielle inländische geologische CO<sub>2</sub>-Speicherentwickler werden nicht als Schlüsselpartner in Erwägung gezogen. Des Weiteren wird es als wichtig erachtet, dass ausländische Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen ihre jeweiligen Infrastrukturen bis an die Schweizer Landesgrenze errichten.*



*Interviewpartner im Bereich **geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung** sehen ebenfalls in der Anfangs- und Aufbauphase einer CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur strategische und nicht-wettbewerbliche Partnerschaften mit einzelnen Emittenten als potenzielle Ankerkunden einen wichtigen Schlüssel zu einer erfolgreichen Realisierung. Emittenten im KVA-Bereich unternehmen unabhängige Abklärungen zu Co-Nutzung bekannter und genutzter geothermische Reservoirs als geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher.*

*Grundsätzlich ist es aus Sicht der Interviewpartner sinnvoll, wenn in der Anfangs- und Aufbauphase das Wettbewerbs- und Kartellrecht strategische Partnerschaften zwischen potenziellen Wettbewerbern und entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Stichwort: CCS-Hub) erlauben kann. Dies wird zum Beispiel im dänischen Gesetz zum CO<sub>2</sub>-Transport mittels Rohrleitungen angedacht. Es wird einerseits durch gesetzliche Vorgaben und Bedingungen für den Zugang Dritter zum CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz und andererseits durch das Vorhandensein eines starken Regulators ermöglicht, der unter anderem eine transparente und öffentliche Preisgestaltung durchsetzt.*

### **Soll-Zustand:**

Der Kreis der Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Technologien ist ebenso limitiert wie die Anzahl möglicher Entwickler und Betreiber von **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen**. Die *ultima ratio* der zu betreibenden Infrastrukturen ist einerseits die aus volkswirtschaftlicher Sicht kostengünstige Zielerreichung einer Netto-Null-Schweiz bis 2050 (und darüber hinaus eine «Netto-Negative» Schweiz) und andererseits eine aus betriebswirtschaftlicher Sicht möglichst minimale «Kostenstelle». Partnerschaften unter Wettbewerbern stehen unter Marktaufsicht, sind aber innerhalb eines Segments der CCS-Wertschöpfungskette aber auch über die Segmente hinaus allgemein üblich. Partnerschaften mit Lieferanten und Erstausrüstern sind im Sinne des Wettbewerbs- und Kartellrechts sowie des wettbewerblichen Beschaffungswesens zu betrachten.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die operativen und strategischen Partner der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber. Letztere sind selbst operative Partner. Unter der Annahme, dass das Schweizer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz über Anschlüsse an das europäische CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz verfügt, fungieren die schweizerischen und europäischen Betreiber beim internationalen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport als Partner.

**Tabelle 3:** Operative und Strategische Partner von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern

| Partner von CO <sub>2</sub> -Rohrleitungs- und geologischen CO <sub>2</sub> -Speicherbetreibern                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Operative Partner:                                                                                                                                          |
| – Dienstleister (z.B. Bauunternehmungen, spezialisierte Dienstleister für Rohrleitungsbau, Bohrunternehmungen, erdwissenschaftliche Prospektion, MMV, etc.) |
| – OEMs                                                                                                                                                      |
| – Ingenieurbüros                                                                                                                                            |
| Strategische Partner:                                                                                                                                       |
| – Standortgemeinden                                                                                                                                         |
| – Kantonale Behörden                                                                                                                                        |
| – Bundesbehörden (BAFU, BFE, ARE, swisstopo)                                                                                                                |



## E. Infrastruktur

CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber benötigen physische und digitalen Ressourcen, um ihre Angebote erbringen zu können (d.h. Gebäude, Rohrleitungen, Maschinen, IT-Systeme, etc.).

### Ist-Zustand:

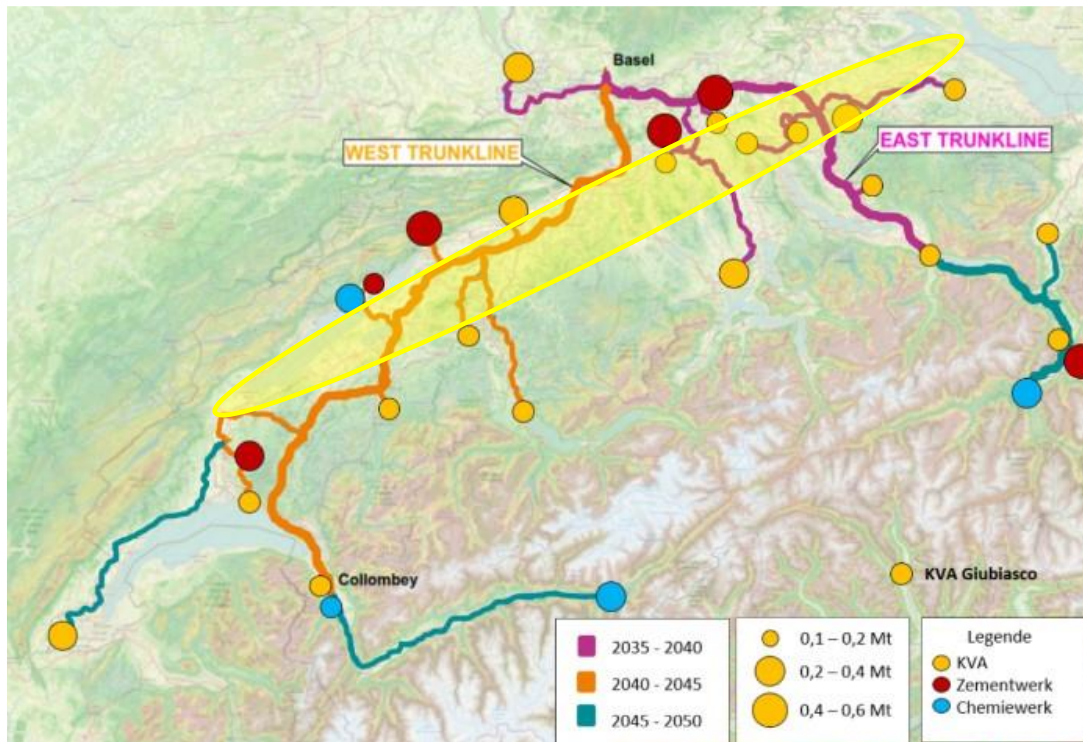
*Bis heute sind keine wesentlichen **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen** als Schlüsselressource oder als Teil des Wertversprechens vorhanden. Von grosser Bedeutung ist die Realisierung einer ersten CO<sub>2</sub>-Rohrleitung im Niederdruckbereich, die eine Abscheidungsanlage mit einem Bahnverladepunkt verbindet im Fall der KVA Linth in Niederurnen (GL). Des Weiteren gibt ein «kleinstskaliges» Pilotprojekt mit einer Grössenordnung von einigen 100 Tonnen CO<sub>2</sub> für die CO<sub>2</sub>-Injektion in einen möglichen Speicherkomplex, der im Zusammenhang mit einer Nagra-Bohrung in Trüllikon erbohrt wurde.*

### Soll-Zustand:

Abbildung 9 zeigt ein Szenario im Jahr 2050 eines nationalen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes mit zwei Stammstrecken (Stammstrecke WEST und Stammstrecke OST) gemäss SAIPEM (2020) [6] und ein Gebiet mit Potenzial für geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung (gelb schattiert) nach Chevalier et al. (2010) [9]. Die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen werden durch assoziierte Anlagen wie Pumpen und Kompressoren unterstützt. Es gibt Anschlüsse an Deutschland bei Basel (BS) und an Frankreich / Italien bei Collombey (VS). Aufgrund der Lage einzelner Punktemittenten im Gebiet mit Potenzial für geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung sind Konstellationen denkbar, in denen sich eine Punktquelle in unmittelbarer Nähe eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speichers befindet und somit ohne Inanspruchnahme der Infrastruktur auskommen könnte. Derzeit wird dies jedoch als Ausnahme von der Regel betrachtet.

Die Bereitstellung und der Zugang zu **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen** sind einerseits ein Teil des Wertversprechens, da dies einen Kernnutzen für die Kunden darstellt. Andererseits sind die Infrastrukturen Schlüsselressourcen für die Akteure, da die Planung, der Bau, der Betrieb und der Unterhalt sowie die Nachsorge vor dem Heimfall der geologischen Speicherkonzessionen essenziell für jeden Infrastrukturbetreiber ist. Weiterhin ist die Planung, der Bau, der Betrieb und der Unterhalt der Infrastrukturen ein kritischer Bestandteil des Geschäftsmodells, da es sich um den Kern der in Wert zu setzenden Dienstleistungen handelt.





**Abbildung 9:** Zielbild einer konzeptionellen Variante des Hochlaufplans der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen mit Hervorhebung der verschiedenen Bauabschnitte (farblich voneinander getrennt). Bei den «fett» hervorgehoben Rohrleitungen handelt es sich, um die Stammstrecken der Abschnitte Ost und West. Weiter werden in der Darstellung Anlagen mit jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von >100'000t CO<sub>2</sub> berücksichtigt. Die gelb schattierte Fläche zeigt die Potenzialregion mit bis zu vier unterschiedlichen geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherkomplexen in verschiedenen Tiefen an, wobei die Speicherkapazität nicht nachgewiesen ist. Quelle: SAIPEM (2020, Map) [6], Giardini et al. (2021, Abbildung 25, S. 26) [10]; Abbildung nach Albicker et al. (2023, Abbildung 2, S. 18) [2]

## F. Schlüsselaktivitäten

Schlüsselaktivitäten sind die wichtigsten Tätigkeiten, die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber ausführen, um ihre Angebote und Wertversprechen zu erbringen und Einnahmen zu generieren. Aufgrund der politisch bedeutenden klimapolitischen Themen zählen eine ausgezeichnete Information und Kommunikation auch zu den Schlüsselaktivitäten.

### Ist-Zustand:

Die Schlüsselaktivitäten von **Rohrleitungsbetreibern** konzentrieren sich heute in erster Linie auf die Planung von Rohrleitungsabschnitten in lokal definierten Regionen. In Fall der KVA Linth wird ein wenige Kilometer langer Rohrleitungsabschnitt von der Abscheidungsanlage hin zum Verladepunkt durch einen Bau realisiert. Gleichzeitig stellen sich planerische und umsetzungsbezogene Arbeiten hinsichtlich der Reinigung, der Trocknung und Kompression von CO<sub>2</sub> für den Transport, die eine Frage einschliessen, ob diese Schritte am Abscheidestandort oder an einem Transportknotenpunkt erfolgen soll, wobei bei letzterem Ansatz Skalierungsmöglichkeiten ergeben können.

Die Absenz von allgemein gültigen Richtlinien für die Spezifikation der CO<sub>2</sub>-Ströme hinsichtlich ihrer erlaubten Zusammensetzung erschwert die klare Definition und Ausübung der Schlüsselaktivitäten für die erforderliche Erlangung der Reinheit, Trockenheit und Anforderungen an die Kompression. Diese



Anforderungen werden letztendlich stark durch die zukünftigen Betreiber der CO<sub>2</sub>-Stammstrecken oder CCS-Hubs bestimmt.

Auf der betriebswirtschaftlichen Seite umfassen die aktuellen Schlüsselaufgaben die Kundenakquise, die Analyse der Finanzen (Kostenstruktur und Generierung von Einnahmequellen), sowie die Erstellung geeigneter Eigentümer- und Finanzierungskonzepte.

Im Bereich der Kommunikation und deren Pflege identifizieren Rohrleitungsbetreiber grossen Bedarf, Zielgruppen im gesellschaftspolitischen Kontext wie die breite Bevölkerung und betroffene Anspruchsgruppen wie Anrainer zu informieren und zu sensibilisieren.

Die Schlüsselaktivitäten der potenziellen Entwickler von **geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern** fokussieren sich heute auf Vorarbeiten für das «Screening und die regionale Bewertung der Speicherressourcen», der ersten Phase des Lebenszyklus von geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern. So werden in Folge lokaler Verfügbarkeiten von Untergrunddaten opportunistisch an sehr wenigen Stellen in der Schweiz bestehende Daten aufgearbeitet, um ein Screening vorzunehmen. Jedoch sind die Qualität und die Verwendbarkeit dieser Daten für das Screening nur sehr bedingt aussagekräftig.

Keiner der potenziellen Akteure verfolgt Schlüsselaktivitäten, um die weiteren Lebenszyklusphasen durchzuführen, d.h. die Charakterisierung und Bewertung des Speicherkomplexes, die Erschliessung des Speichers, den Betrieb, nach Injektionsstopp die Nachsorgeüberwachung/Vor-Heimfall, oder die Unterstützung für Kantone während des Post-Transfer / Nach-Heimfall.

Die tatsächlichen Aktivitäten und deren Herausforderungen zeigen die Vielfalt und Pionierhaftigkeit der Aufgaben auf und lassen sich übergeordnet wie folgt ergänzend zusammenfassen:

- Es bedarf einer klaren Aufgabenteilung zwischen den Akteuren und auch auf Seiten Behörden. Geologen wünschen sich für deren potenzielle Rolle als Umsetzer (Planung, Bau, Betrieb) eine Raumentwicklung mittels einer koordinierten Sachplanung auf Stufe Bund, analog zum Sachplan geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle.
- Die beteiligten Akteure konzentrieren sich auf ihre jeweiligen Teilbereiche und erwarten vom Bund, dass dieser den Überblick wahrt, die Koordination übernimmt und gegebenenfalls die Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette – von der Abscheidung über den Transport bis zur (geologischen) Speicherung – sicherstellt.
- Gemäss den Akteuren wäre ein sinnvoller erster Schritt der Aufbau von Plattformen zur Wissensvermittlung sowie eines aktiven Schnittstellen-Managements auf technisch-operativer Ebene. Ergänzend braucht es einen gemeinsamen Bezugsrahmen, um die unterschiedlichen Perspektiven der Akteure einordnen und zusammenführen zu können.
- Aktive Player im CCS-Bereich (z.B. KVA Linth) zeichnen sich durch «Learning by Doing» aus. Fachliche Kompetenz wird über OEMs eingeholt. Schweizerische Ingenieurbüros haben lediglich limitierte Kompetenzen.

### **Soll-Zustand:**

Sowohl die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- wie auch die geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber haben gestützt auf ihre Betriebskonzepte und insbesondere ihrem Angebot und Wertversprechen, sowohl technische wie auch betriebswirtschaftliche und administrative Schlüsselaktivitäten bestimmt, um erfolgreich und kostengünstig ihre Aufgaben zu erfüllen. Insbesondere besteht ein Verständnis, welche der Schlüsselaktivitäten intern verfolgt und welche durch Dienstleister zur Verfügung gestellt werden.

Bei den **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreibern** konzentrieren sich die Schlüsselaktivitäten zuerst auf die eines Bauherren, der die Planung und den Bau der Anlagen auf oberster Stufe vorantreibt. Die tatsächlichen Arbeiten werden durch eine Vielzahl von Dienstleistern erledigt, die einerseits in der Schweiz oder für



spezialisierte Fragen des CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransports in Europa verfügbar sind. Danach konzentrieren sich die Schlüsselaktivitäten auf den Betrieb und Unterhalt.

Die **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber** haben die geeignete Aufteilung der Schlüsselaktivitäten im Bereich der Prospektion, der Erschliessung und des Betriebs vorgenommen. Sie beherrschen die Lebenszyklusphasen eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speichers; das «Screening und der regionalen Bewertung der Speicherressourcen», die «Charakterisierung und Bewertung eines konkreten Speicherkomplexes», die «Erschliessung des CO<sub>2</sub>-Speichers», der «Betrieb von geologischen Speichern», sowie die «Nachsorgeüberwachung/Vor-Heimfall». Gewisse spezialisierte Aufgaben, die sich aus der Wechselwirkung vom injizierten CO<sub>2</sub> mit den natürlich vorkommenden Gesteinen und darin enthaltenen Fluiden werden von externen Dienstleistern wahrgenommen (z.B. die Beseitigung von mineralischen Ausfällungen im Bohrloch und im bohrlochnahen Gestein).

Zentrale Schlüsselaktivitäten wie die Analyse und Interpretation von Prospektionsdaten sowie die Planung und Designs der Erschliessungsarbeiten im Untergrund (Tief- und Horchbohrungen) und der obertägigen Anlagen werden durch ausgewiesene interne Experten vorgenommen. Spezialisierte Dienstleister werden in Anspruch genommen, um für CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber beispielsweise Daten zu akquirieren oder die geplanten Tiefbohrungen zu erstellen. Während der Betriebsphase erfolgt der Betrieb und das Management des geologischen CO<sub>2</sub>-Speichers durch intern verfügbare Ingenieure und Wissenschaftler, wobei Dienstleister für Routineaufgaben in Anspruch genommen werden.

Weitere Schlüsselaktivitäten im Bereich des Verfahrensingenieurwesens sind:

- Prüfung der CO<sub>2</sub>-Reinheit
- Konversion des gasförmigen CO<sub>2</sub> in flüssiges / superkritisches CO<sub>2</sub>
- Messung des CO<sub>2</sub>-Durchflusses
- Regelmässige Wartung der Leitungen

Auf kommunikativer Ebene bedarf es für den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport und für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung der Sensibilisierung der Schweizer Bevölkerung, inkl. Medienpräsenz (Perspektive CO<sub>2</sub>-Reduktion, Innovation/Cleantech in der Schweiz, etc.) sowie ausgezeichneten Kommunikationen aufgrund der politisch bedeutenden klimapolitischen Themen.

Tabelle 4 fasst die Schlüsselaufgaben von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern in den verschiedenen Lebenszyklusphasen zusammen.



**Tabelle 4:** Schlüsselaufgaben von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern

| CO <sub>2</sub> -Rohrleitungsbetreiber                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Geologische CO <sub>2</sub> -Speicherbetreiber                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– Sensibilisierung der Schweizer Bevölkerung, inkl. Medienpräsenz (Perspektive CO<sub>2</sub>-Reduktion, Innovation/Cleantech in der Schweiz, etc.) sowie ausgezeichneter Kommunikationen aufgrund des politisch bedeutenden klimapolitischen Themas.</li></ul>                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"><li>– <b>Entwicklung:</b> Planung des Rohrleitungsnetzes, Aushub des Untergrunds, Verlegung der Rohrleitungen, Dichtigkeitsprüfung, Schliessung des Untergrunds, etc.</li><li>– <b>Betrieb:</b> Kompression des gasförmigen CO<sub>2</sub> in flüssiges / superkritisches CO<sub>2</sub>, Messung des CO<sub>2</sub>-Durchflusses, regelmässige Wartung der Leitungen, etc.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– <b>Entwicklung:</b> Konzessionen, Analyse und Interpretation von Prospektionsdaten, Planung und Designs der Erschliessungsarbeiten im Untergrund (Tief- und Horchbohrungen) und der oberflächigen Anlagen, drei Injektionsbohrungen und eins bis zwei Horchbohrungen pro Speicher, etc.</li><li>– <b>Betrieb:</b> Entgegennahme und Nachbehandlung des CO<sub>2</sub>, Injektionen des CO<sub>2</sub>, geophysikalische Messungen zur Überwachung, etc.</li><li>– <b>Schliessung:</b> Versiegelung der Bohrlöcher und Injektionsstellen, Nachsorgeüberwachung, etc.</li></ul> |

**Exkurs:**

*Aufgrund der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher sowie einer möglichen Spezialisierung von Speicherentwicklern (nicht Betreibern) auf einzelne, dem Injektionsbetrieb vorgelagerte Phasen, lässt sich eine differenziertere, nachgelagerte Wertschöpfungskette ableiten – mit Fokus auf Entwicklung, Bau, Betrieb und Nachsorge von CO<sub>2</sub>-Speichern. Diese Differenzierung wird im Rahmen der Studie jedoch nicht weiter vertieft – mit Ausnahme der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Prospektions- und Explorationsarbeiten sowie die Konzessionierung von Speicheraktivitäten. Besonderes Augenmerk liegt hier auf der Möglichkeit, gängige Vertragsmodelle aus dem Erdöl- und Erdgasbereich wie «Farm-in» und «Farm-out»-Vereinbarungen unkompliziert zuzulassen.*

## G. Ressourcen und Organisation

Die Ressourcen umfassen sowohl physische Ressourcen wie Gebäude, Ausrüstung, Maschinen- und Fuhrparks; immaterielle Vermögenswerte wie Warenzeichen, Marken, firmeneigene Geschäftspraktiken, Urheberrechte und Patente, insofern sie einen Wettbewerbsvorteil erzeugen; Humanressourcen, die entscheidend sind für die Umsetzung des Geschäftsmodells einschliesslich der Fähigkeiten, Kenntnisse und Talente der Mitarbeiter sowie der spezifischen Fachkenntnisse und des Know-hows, die das Unternehmen einzigartig machen; und schliesslich die finanziellen Ressourcen oder monetären Vermögenswerte, das Kapital, die Barmittel, Kreditlinien und andere Finanzinstrumente, die das Unternehmen für seinen Betrieb, seine Investitionen und sein Wachstum benötigt.

**Ist-Zustand:**

*Zum heutigen Zeitpunkt verfügen die Akteure im Bereich **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** nur sporadisch über die notwendigen Ressourcen. Insbesondere verfügt die schweizerische Midstream-Erdgasindustrie über die geeigneten Humanressourcen, um die Planung, den Bau und Betrieb einer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur in Angriff nehmen zu können. Aufgrund der hohen Unsicherheit war kein Akteur bisher in der Lage, finanziellen Ressourcen für mehr als die Planungsphase zu akquirieren. Ähnlich wie bei den Akteuren, die im Bereich der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur agieren, sind*



*immaterielle Vermögenswerte zu vernachlässigen, da es in erster Linie darum geht, bestehendes Wissen und praktische Erfahrung aus dem Ausland zu erwerben.*

*Bei den Akteuren im Bereich der **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur** sind keine nennenswerten Ressourcen etwelcher Art vorhanden mit Ausnahme des geologischen Landesdiensts swisstopo, der die Frühphase im Lebenszyklus von CO<sub>2</sub>-Speichern, das «Screening und der regionalen Bewertung der Speicherressourcen», aus personeller Sicht in Angriff nehmen könnte.*

### **Soll-Zustand:**

Abgesehen von firmeneigenen Geschäftspraktiken und Marken werden immaterielle Vermögenswerte keine überragende Bedeutung haben. Allerdings kann sich ein hohes Ansehen in bevorzugten (strategischen) Partnerschaften manifestieren und gute Leistungsnachweise unter anderem im Bereich des «Health, Safety and Environmental Management» in einem Wettbewerbsvorteil bei Ausschreibungen von Konzessionen oder Bewilligungen.

Aufgrund der Nähe zu den **Rohrleitungsinfrastrukturen** des Erdgasbereichs kann davon ausgegangen werden, dass sich die schweizerische Industrie innerhalb von vielleicht 10 bis 15 Jahren die notwendigen Human- und physischen Ressourcen aufbauen kann, um eine äquivalente CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur zu errichten. Ähnlich wie bei der Erfahrung mit der Transitgas AG zu Beginn der 1970er Jahre kann eine Verknüpfung mit europäischen Infrastrukturen stark katalysierend wirken (Gisler (2023) [15]). Die physischen Ressourcen werden hauptsächlich das Rohrleitungsnetz einschliesslich der Booster-/ Kompressor-Stationen umfassen sowie in verhältnismässig begrenztem Ausmass Gebäude, Ausrüstung, Maschinen- und Fuhrparks. Die Humanressourcen sind ähnlich derer, die die heutige schweizerische Midstream-Erdgasindustrie ausmacht.

Wird von einem über die nächsten 100 bis 200 Jahre notwendigen Bedarf an **geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherung** ausgegangen, ist ein dynamisches Portfolio von rund zehn geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern vorstellbar, wobei jeder Speicherstandort in erster Näherung über eine Betriebsdauer von 30 Jahren eine jeweilige Speicherkapazität von 6 bis 12 Millionen Tonnen hat und so rund 200'000-400'000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr speichern kann. Daher kann davon ausgegangen werden, dass folgende Ressourcen notwendig sind: Pro Speicherstandort umfassen die physischen Ressourcen rund eins bis drei Injektionsbohrungen auf einem Fussballfeld grossen Bohrplatz mit diversen obertägigen Anlagen für die Entgegennahme und Nachbehandlung des CO<sub>2</sub> vom Rohrleitungsbetreiber sowie für das MMV der gespeicherten CO<sub>2</sub>-Mengen; ferner eins bis zwei Horschbohrungen mit einer Umhausung mit einer Dimension einer typischen Autogarage, sowie in begrenztem Ausmass Gebäude, Ausrüstung, Maschinen- und Fuhrparks. Maschinen, Ausrüstungen für die Charakterisierung und Bewertung konkreter Speicherkomplexe sowie für die Erschliessung des CO<sub>2</sub>-Speichers werden von beauftragten Dienstleistern geliefert und nach temporärer Arbeit wieder demobilisiert.

Die konzessionierten Speicherkomplexe werden an sich nicht bilanziert. Es kann jedoch erwartet werden, dass Speicherkapazitäten in ähnlicher Weise wie Erdöl- und Erdgasreserven als ergänzende Informationen im Jahresabschluss eines Unternehmens zu melden sind. So ist weiter vorstellbar, dass verfügbare Speicherkapazitäten, die sich im Untergrund befinden, nicht einen Vermögenswert darstellen. Sobald jedoch die Speicherkapazität registriert und zertifiziert ist, wird sie als Produkt- und Warenbestand geführt.

Je nach Ansatz zur Aufsuchung, Entwicklung, Betrieb und Vor-Heimfall-Nachsorge, kann davon ausgegangen werden, dass die Humanressourcen für die Phasen «Screening und der regionalen Bewertung der Speicherressourcen», «Charakterisierung und Bewertung eines konkreten Speicherkomplexes», «Erschliessung des CO<sub>2</sub>-Speichers», und «Betrieb von geologischen Speichern» sowie «Nachsorgeüberwachung/Vor-Heimfall» stark fluktuieren. Jedoch wird bei einer dynamischen





Portfoliobewirtschaftung (z.B. von zehn geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherstätten) mit Aktivitäten in allen Lebenszyklusphasen ein Kernbestand von Erdwissenschaftlern/innen (Geologie, Geophysik, Geochemie), Bohr- und Komplettierungsingenieuren/innen, Produktionsingenieuren/innen, Reservoir-Ingenieuren/innen, von Verfahrensingenieuren/innen, operativem Betriebspersonal im Mehrschichtbetrieb, Wissenschaftler/innen und Ingenieure/innen für das MMV, und eine Geschäftsadministration (Beschaffungs- und Vertragswesen, Legal, Verwaltung, Management) notwendig sein.

Vergleichsweise hatte die Nagra während den mehr oder weniger äquivalenten Lebenszyklusphasen «Screening und der regionalen Bewertung der Speicherressourcen» und «Charakterisierung und Bewertung eines konkreten Speicherkomplexes» rund 80 bis 120 Vollzeitäquivalente an Humanressourcen und jährliche Betriebsausgaben von CHF 50 Millionen.

## H. Finanzen

Beim Thema Finanzen geht es um die Einnahmequellen und die Kostenstruktur von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber. Die Einnahmequellen zeigen, wie sie Geld verdienen, während die Kostenstruktur die Ausgaben auflistet, die zur Erbringung der Wertangebote und zum Betrieb des Geschäfts notwendig sind. Beide Bausteine sind entscheidend, um die finanzielle Tragfähigkeit der jeweiligen Geschäftsmodelle zu verstehen und zu planen.

### Kostenstruktur

#### Ist-Zustand

*Über die tatsächliche, praktische Kostenstruktur ist wenig bekannt. Grobe Informationen liefern uns eine Reihe von Anmerkungen für die Entwicklung von **CO<sub>2</sub>-Transport- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen** im Projekt «CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf dem Areal Werdhölzli»<sup>9</sup>. Dieses Demonstrationsprojekt verfügt über einen vermuteten «Technology Readiness Level» von 7-8/9 und einen sehr viel tieferen «Market Readiness Level»<sup>10</sup>. Die Informationen enthalten CAPEX und OPEX Kostenaufstellungen, insbesondere die jährlichen Ausgaben für Transport und Speicherung von rund 23'600 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Für den Transport werden jährlich rund CHF 7.2 Millionen und für die dauerhafte Speicherung (je hälftig in Recycling-Beton und per Lastwagen, Bahn (und Schiff) Richtung Speicherkomplexe unter der dänischen Nordsee) jährlich rund CHF 2.3 Millionen angesetzt. [16] Unter der Annahme, dass die Entgelte für diese Dienstleistungen auf einer Vollkostenrechnung beruhen, können die «Marktpreise» für den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> für diese Demonstrationsanlage konkrete auf CHF 304 bzw. CHF 96 pro Tonne CO<sub>2</sub> interpretiert werden. Die Informationen machen keine detaillierten Angaben zu den Kosten der jeweiligen Speicheroptionen, aber im Fall der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung wird dies hier auf rund CHF 40-60 pro Tonne CO<sub>2</sub> geschätzt, und entsprechend werden vermutlich die Kosten für die Speicherung im Recycling-Beton höher sein als der Durchschnittspreis von CHF 96 pro Tonne CO<sub>2</sub>. Diese «interpretierte» Marktpreisstruktur lässt nur bedingt Rückschlüsse auf die Kosten zu. Darüber hinaus sind die sehr hohen Kosten angesichts eines nicht existierenden Marktes einerseits und der Realisierung einer «First-of-a-kind» Demonstrationsanlage andererseits nicht aussergewöhnlich. Es sei in Erinnerung gerufen, dass heute im VCM Preise von rund USD 5-20 pro Tonne CO<sub>2</sub> bezahlt werden – je nach Qualität der Reduktions- und Removalprodukte.*

<sup>9</sup> Abstimmungspublikation der Stadt Zürich vom 22. September 2024 [16]

<sup>10</sup> IEAGHG Technical Report 2024-01, «The Role of Indices in Assessing the Maturity of CCUS Technologies and their Readiness for Deployment», February 2024 [28]





## **Soll-Zustand**

Für die **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur** sei einleitend erwähnt, dass der Rohrleitungsdurchmesser ein wichtiger Faktor in der Kostenstruktur ist. Dieser wird bestimmt durch die maximalen Durchflussraten des CO<sub>2</sub>, der CO<sub>2</sub>-Eingangstemperatur, der Rohrleitungslänge, die zu traversierenden Höhenunterschiede, die Eingangs- und Ausgangsdrücke, die Pumpanlagen, die Pumpeffizienz und die Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Stroms, der im Einklang mit der EU CCS Richtlinie [7] überwiegend aus CO<sub>2</sub> besteht, wobei zufällig anfallende Stoffe aus beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Quelle oder aus dem Abscheidungs- oder Injektionsverfahren enthalten sein dürfen. Während der Bauphase sind daraus abgeleitet die wichtigsten Kostentreiber die spezifischen Rohrkosten, die Arbeitskosten, Kosten und Entschädigungen für Durchleitungs-Dienstbarkeiten, allgemeine Kosten<sup>11</sup>, und die jährlichen Betriebs- und Unterhaltskosten.

Je nach Vereinbarung zwischen dem CO<sub>2</sub>-Abscheider und dem CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber wird das CO<sub>2</sub>, das nach dem Abscheideprozess gasförmig ist und daher einen tiefen Druck aufweist (z.B. 0.1 MPa), mittels einer Pumpe auf den Druck erhöht, den der Rohrleitungsbetreiber gemäss der CO<sub>2</sub>-Spezifikation verlangt. Hinzukommen noch allfällige Verfahrensschritte für die Trocknung und Reinigung. Auf mögliche Synergien hinsichtlich Kompression, Trocknung und Reinigung mit anderen Abscheidern innerhalb eines Clusters wird nicht weiter eingegangen. Für die Zwecke dieses Berichts wird davon ausgegangen, dass diese Schritte durch den CO<sub>2</sub>-Abscheider und deren Verbünde vorgenommen werden und daher ausserhalb des Studienrahmens liegen.

Reibungsverluste, Höhenunterschiede durch Berg- und Talquerungen, Temperaturschwankungen während des CO<sub>2</sub>-Transports in den Rohrleitungen, etc. führen zu Druckabfällen, die in sorgfältig ausgewählten Booster/Kompressor-Stationen ausgeglichen werden, um das Druckniveau zu halten, das von den Kunden und Partnern für die Abnahme (z.B. geologische Speicherung, Transitpunkte in ausländische Rohrleitungsnetze, Weiterverarbeitung oder -verwendung, etc.) verlangt wird. [17, 18] Wenn auch die Investitions- und Unterhaltskosten in erster Näherung im Vergleich zu den Rohrleitungskosten vernachlässigbar sind, sind die Energiekosten für den Betrieb der Kompressoren nicht vernachlässigbar. Tabelle 5 enthält eine Übersicht der Kostenstruktur eines CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreibers in den verschiedenen Lebenszyklusphasen.

**Tabelle 5:** Kostenstruktur eines CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreibers

| <b>Kostenstruktur in den verschiedenen Lebenszyklusphasen</b> |                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| –                                                             | <u>Phase 1 «Planung, inkl. Genehmigungen»:</u><br>Personal und Dienstleister                                                                                          |
| –                                                             | <u>Phase 2 «Bau - Ausheben, Verlegen, Testen»:</u><br>Personal und Dienstleister, Material (Rohrleitungen), Maschinen (z.B. Booster Stations, Durchflussmesser), etc. |
| –                                                             | <u>Phase 3 «Betrieb»:</u><br>Personal und Dienstleister, Unterhalt, Reparaturen und Ersatz, Versicherungen, Energie, etc.                                             |

<sup>11</sup> Allgemeine Kosten schliessen Kosten für die Vermessung, Ingenieurleistungen, Überwachung, Unvorhergesehenes, Telekommunikationsausrüstung, Fracht, Steuern, Rückstellungen für während der Bauphase verwendete Mittel, Verwaltung und Gemeinkosten sowie behördliche Gebühren ein.



Die Kostenstruktur der einzelnen Lebenszyklusphasen einer **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur** unterscheiden sich kostenseitig sehr stark. Während die Phase «Screening und der regionalen Bewertung der Speicherressourcen» in erster Linie eine Sache des Schreibtischstudiums ist, umfasst die «Charakterisierung und Bewertung eines konkreten Speicherkomplexes» Arbeiten im Feld, sowohl für die Prospektion wie auch für die Exploration für die Bestätigung eines Vorhandenseins eines CO<sub>2</sub>-Speichers. Die Investitionskosten für die «Erschliessung des CO<sub>2</sub>-Speichers» mittels Bohrungen sind naturgemäss der grösste Kostenfaktor innerhalb des Lebenszyklus, während der «Betrieb von geologischen Speichern» in erster Linie durch Betriebs- und Unterhaltskosten, die sich jährlich im Rahmen von 5% der zuvor getätigten Investitionskosten bewegen. Die «Nachsorgeüberwachung/Vor-Heimfall» ist nach Abschluss der aktiven Injektion nur noch ein Bruchteil der aktiven Betriebskosten. Tabelle 6 enthält eine Übersicht der Kostenstruktur eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers in den verschiedenen Lebenszyklusphasen.

**Tabelle 6:** Kostenstruktur eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers

| <b>Kostenstruktur in den verschiedenen Lebenszyklusphasen</b> |                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| –                                                             | <u>Phase 1 «Screening und regionale Bewertung der Speicherressourcen»:</u><br>Personal und Dienstleister                                                                     |
| –                                                             | <u>Phase 2 «Charakterisierung und Bewertung des Speicherkomplexes»:</u><br>Personal und Dienstleister                                                                        |
| –                                                             | <u>Phase 3 «Erschliessung des CO<sub>2</sub>-Speichers»:</u><br>Personal und Dienstleister, Bohrungen, CO <sub>2</sub> Tests, Oberflächen- und Testinstallationen, etc.      |
| –                                                             | <u>Phase 4 «Betrieb von geologischen Speichern»:</u><br>Personal und Dienstleister, Unterhalt, Reparaturen und Ersatz, Versicherungen, Gebühren, Konzessionen, Energie, etc. |
| –                                                             | <u>Phase 5 «Schliessung»:</u><br>Personal                                                                                                                                    |
| –                                                             | <u>Phase 6 «Nach-Schliessung / Vor-Rückgabe der Konzession / Bewilligung»:</u><br>Personal und «Plug + Abandonment» der Bohrungen                                            |

## **Einnahmequellen**

### **Ist-Zustand**

*Die existierenden Produkte auf dem Kohlenstoffmarkt zielen hauptsächlich auf eine Emissionsminderung. Produkte, die auf der CO<sub>2</sub>-Entfernung beruhen, bilden aktuell eine Nische im Kohlenstoffmarkt und sind aufgrund des tiefen Preisniveaus weniger geeignet für den grossskaligen Einsatz von CCS-Technologien, insbesondere für die Finanzierung von **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung** (vgl. Abbildung 4.4. in Smith et al. (2024) [19]). In heutigen Projekten werden die Einnahmen, die zumindest teilweise die Kosten decken, über öffentliche Förderinstrumente oder durch besondere politische Entscheide (z.B. CCS Werdhölzli Stadt Zürich [16]) zur Verfügung gestellt.*

### **Soll-Zustand**

Der Betrieb von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen benötigt keine staatlichen Fördermassnahmen.



**CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber** erheben Gebühren für das von ihnen transportierte CO<sub>2</sub> (CHF pro Tonne zu transportierendes CO<sub>2</sub>). Für die Lieferung von CO<sub>2</sub> von einem inländischen CO<sub>2</sub>-Abscheider oder Betreiber von DAC-Technologien zu einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherstätte in der Schweiz gilt ein vereinbarter Durchschnittspreis. Dadurch bezahlen Abscheider, die weiter von einem geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher entfernt liegen, nicht mehr als Betreiber, die sich in der Nähe eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speichers befinden. Des Weiteren gibt es Preise für ausländische Lieferungen von CO<sub>2</sub> zur Speicherung in der Schweiz (ENTER), für den Fluss durch die Schweiz (TRANSIT; z.B. von Italien nach Deutschland) und für den Transport von Schweizer CO<sub>2</sub> ins benachbarte Ausland (EXIT).

**Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber** verkaufen auf der CO<sub>2</sub>-Handelsplattform PCRU-Zertifikate an Abscheider (CHF pro Tonne zu speicherndes CO<sub>2</sub>). Dieses Produkt geht über eine «Bescheinigung von Senkenleistungen» hinaus, indem vor allem die Dauerhaftigkeit der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung berücksichtigt und eingepreist wird. Die Preisgestaltung ist wettbewerblich (evtl. zu Beginn durch einen «Market Maker» unterstützt).

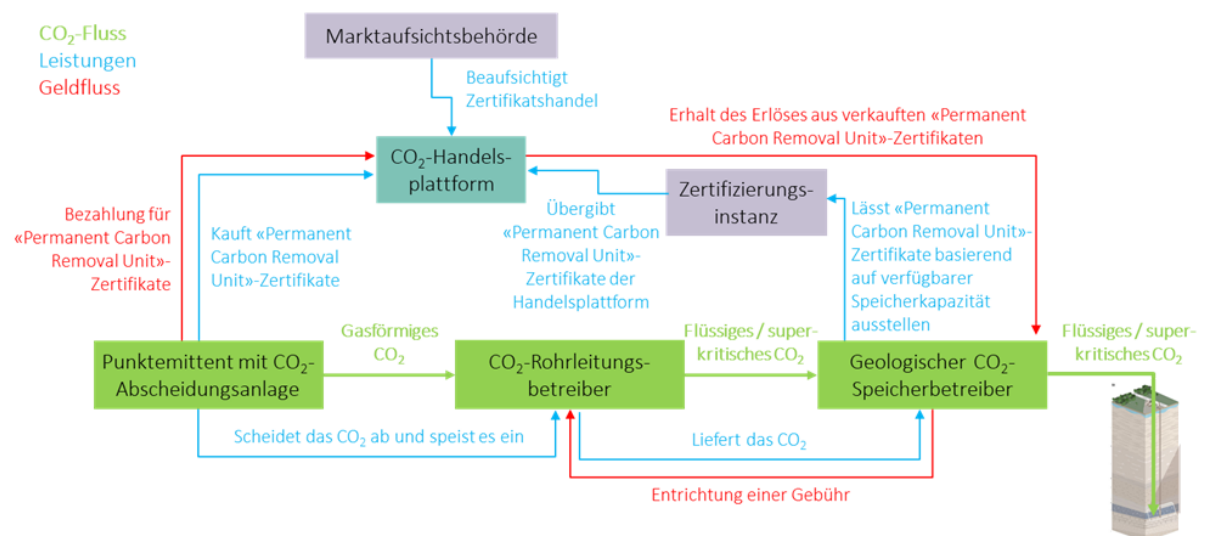
Tabelle 7 fasst die Einnahmequellen von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern zusammen.

**Tabelle 7:** Einnahmequellen von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern

| CO <sub>2</sub> -Rohrleitungsbetreiber                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Geologische CO <sub>2</sub> -Speicherbetreiber                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unterschiedliche Gebühren (CHF pro Tonne zu transportierendes CO <sub>2</sub> ) für: <ul style="list-style-type: none"><li>– inländischen Transport von CO<sub>2</sub></li><li>– Import von CO<sub>2</sub></li><li>– Export von CO<sub>2</sub></li><li>– Transit von CO<sub>2</sub> (Import mit anschliessendem Export)</li></ul> | Verkauf von PCRU-Zertifikaten an CO <sub>2</sub> -Abscheider auf der CO <sub>2</sub> -Handelsplattform (CHF pro Tonne zu speicherndes CO <sub>2</sub> ) |

Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung des physischen CO<sub>2</sub>-Flusses (grüne Pfeile), der zu erbringenden Leistungen (blaue Pfeile) und des entsprechenden Geldflusses zwischen einem Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage, einem CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber und einem CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber (rote Pfeile).

Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> folgt dabei einem klar definierten Pfad: Es wird physisch vom Emittenten an den Rohrleitungsbetreiber und anschliessend an den Speicherbetreiber übergeben. Mit jedem Übergang geht auch die Verantwortung für das CO<sub>2</sub>, einschliesslich der Haftung im Falle von Störungen, auf den jeweiligen nächsten Akteur über.



**Abbildung 10:** Schematische Darstellung des physischen CO<sub>2</sub>-Flusses (grüne Pfeile), der zu erbringenden Leistungen (blaue Pfeile) und des entsprechenden Geldflusses (rote Pfeile) zwischen einem Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage, einem CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber und einem geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber in der Schweiz. Quelle: conim AG.

Wenn davon ausgegangen wird, dass 100% des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen zum geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber gelangen, sieht der Prozess folgendermassen aus:

- Der geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber bietet auf einer CO<sub>2</sub>-Handelsplattform von einer unabhängigen Zertifizierungsinstanz ausgestellte PCRU-Zertifikate an, die seiner jährlichen Kapazität zur CO<sub>2</sub>-Speicherung entsprechen. Deren Preis deckt auch die Kosten für den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport.<sup>12</sup>
- Die Preisgestaltung der PCRU-Zertifikate des geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers ist transparent. Eine Aufsichtsbehörde überwacht den Kauf bzw. Verkauf der Zertifikate.
- Der Punktemittent mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage kauft auf der CO<sub>2</sub>-Handelsplattform PCRU-Zertifikate entsprechend seiner benötigten Menge. Dieser Kauf verpflichtet ihn zur Lieferung von CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport an den geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber innerhalb einer «nützlichen» Frist.
- Der Punktemittent mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage «bucht» beim CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber die dafür benötigte Kapazität im CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz und speist das abgeschiedene CO<sub>2</sub> entsprechend in die Rohrleitung ein.
- Der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber liefert das CO<sub>2</sub> an den geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber.
- Der geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber entrichtet dem CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber eine Gebühr entsprechend der transportierten Menge CO<sub>2</sub>.

<sup>12</sup> Falls nicht 100% des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> via CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen zum geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher gelangt, sollte eine vom PCRU-Zertifikat unabhängige Gebühr direkt vom Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlage an den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber entrichtet werden. Auch hier sollte ein Durchschnittspreis pro Tonne CO<sub>2</sub> verwendet werden, damit Abscheider, die weiter von einem geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher entfernt liegen, nicht mehr bezahlen als Betreiber, die sich in der Nähe eines geologischen CO<sub>2</sub>-Speichers befinden.



#### Exkurs:

*Während sich hinsichtlich des physischen Umgangs mit abgeschiedenem CO<sub>2</sub> die konventionelle Wertschöpfungskette von Abscheidung-Transport-Speicherung gut nachvollziehen lässt, sei darauf hingewiesen, dass sich im Rahmen der Geldflüsse und den damit verbundenen vertraglichen Vereinbarungen weitere Wertschöpfungsketten ergeben können – je nach Design des Kohlenstoffmarkts. Beispielsweise könnten Emittenten ohne eigene CO<sub>2</sub>-Abscheidung über einen sekundären Kohlenstoffmarkt oder Handelsplattformen Produkte von Betreibern von DAC-Technologien erwerben, die «ihr» CO<sub>2</sub> geologisch speichern lassen.*

### III. Bausteine des Eigentümer- und Finanzierungskonzepts

#### Trägerschaft, Governance

##### Ist-Zustand

*Es gibt aktuell nur eine private Firma, die sich die Planung, den Bau und den Betrieb eines CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes in der Schweiz zum Ziel gesetzt hat. Die Erdgasnetzbetreiber sind offen für eine Ausweitung ihres Aufgabenbereichs auf CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen. Sie sehen für einen solchen Fall einen Vorteil in einer ähnlichen Eigentümerstruktur, d.h. in Betrieben, die im Besitz der öffentlichen Hand sind. Die Abstimmung mit Emittenten, die ebenfalls im Besitz der öffentlichen Hand sind (z.B. KVA's), würde dadurch auf eine nicht näher bestimmte Weise erleichtert. Emittenten im privaten und öffentlichen Besitz könnten wiederum auch Miteigentümer eines CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibers sein.*

##### Soll-Zustand

Zwischen dem CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz und den geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern bestehen getrennte Eigentumsverhältnisse, d.h. es gibt keine vertikal integrierten Unternehmen. Dadurch lassen sich kartell- und wettbewerbsrechtlich heikle Situationen vermeiden – insbesondere, falls keine Marktaufsichtsbehörde mit den entsprechenden Kompetenzen existiert.

CO<sub>2</sub>-Abscheider und CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber können formell (Mit-)Eigentümer von **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreibern** sein. Ähnlich wie die Niederlande und Norwegen kann sich auch in der Schweiz die öffentliche Hand an einem solchen Unternehmen direkt oder indirekt beteiligen.

Die **geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber** befinden sich im Eigentum privater Unternehmen und/oder von Konzessionären der Kantone, die zur Nutzung des Untergrunds für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung berechtigt sind. Ähnlich wie die Niederlande kann sich auch in der Schweiz die öffentliche Hand an einem solchen Unternehmen direkt oder indirekt beteiligen.

Falls es eine starke, unabhängige Regulierungsbehörde gibt, ist eine eigentumsrechtliche Entflechtung nicht zwingend notwendig, denn auch durch buchhalterische, informationelle oder operationelle Entflechtungen können kartell- und wettbewerbsrechtlich heikle Situationen vermieden werden. Vergleiche Anhang I «Rechtliche Aspekte».

#### Finanzbedarf, Finanzierung

##### Ist-Zustand

*Der Bund fördert aktuell gewisse Forschungs- und Innovationsprojekte im Bereich der negativen Emissionen und CCS-Technologien, z.B. das CO<sub>2</sub>-Injektionspilotprojekt in Trüllikon. Der VBSA hat*



*sich in einer Vereinbarung mit dem Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) dazu verpflichtet eine Demonstrationsanlage für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der KVA Linth zu finanzieren. Dort soll um das Jahr 2030 CO<sub>2</sub> abgeschieden werden, das dann getrocknet, gereinigt, komprimiert, transportiert und langfristig gespeichert wird. Aktuell ist geplant, dieses CO<sub>2</sub> im Ausland zu speichern. Nur ein Bruchteil des Transports wird voraussichtlich über eine CO<sub>2</sub>-Rohrleitung stattfinden.*

*Da die erforderlichen Investitionen beträchtlich sind, benötigen die beteiligten Akteure ein hohes Mass an Planungssicherheit. Entsprechend sollten die Erwartungen hinsichtlich der Finanzierung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen, CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern klar und transparent kommuniziert werden.*

### **Soll-Zustand**

Der Kohlenstoffmarkt hat sich so weit entwickelt, dass spezielle Produkte angeboten werden, deren Inwertsetzung durch das Vorhandensein von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen ermöglicht werden (z.B. PCRU-Zertifikate; vgl. Abschnitt «A. Angebot und Value Proposition (Wertversprechen)» oben). Durch die Differenzierung der Zertifikate kann die hohe Qualität der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit bepreist werden.

Im Folgenden werden die Rohrleitungs- und Speicherkomponenten der Gesteungskosten eines solchen Zertifikats für den «imaginären CCS-Hub» in der Region Bern/Solothurn des illustrativen, konzeptionellen Beispiels dargelegt (siehe «ii Annahmen» in Anhang I «Finanztechnische Details»). Auf die CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die sehr hohe Gesteungskosten aufweist (siehe Albicker et al. (2023) [2]), wird nicht eingegangen.

Zur Berechnung des minimalen Preises der Rohrleitungs- und Speicherkomponente eines Zertifikats werden die Gesteungskosten des Produkts («Levelized Costs of Product»; LCOP) wie folgt berechnet:

- Für die Komponente «geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung»:

$$\text{Net Present Value (CAPEX + OPEX)} / \text{Net Present Value (Tonnen CO}_2 \text{ gespeichert)}$$

- Für die Komponente «CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport»:

$$\text{Net Present Value (CAPEX + OPEX)} / \text{Net Present Value (Tonnen CO}_2 \text{ transportiert)}$$

Unter Anwendung der oben beschriebenen Berechnungsmethode und der Verwendung eines Diskontierungssatzes von 5.69% (für dessen Plausibilisierung siehe «ii Annahmen» in Anhang II «Finanztechnische Details») beträgt der LCOP der Rohrleitungstransport- und Speicherkomponente eines Zertifikats im «imaginären CCS-Hub» des illustrativen, konzeptionellen Beispiels rund CHF 57 pro Tonne entfernten CO<sub>2</sub>. Davon entfallen rund CHF 36 auf die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung und ungefähr CHF 21 auf den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport (Tabelle 8).

Die im Vergleich zu den Studien SAIPEM (2020) [6] und Solomon et al. (2024) [17] errechneten tieferen Kosten der Rohrleitungskomponente beruhen auf den Unsicherheiten bezüglich der Dimensionierung der Rohrleitungen und Kompressionsanlagen, der Ausnutzung von Skaleneffekten, sowie der Kapazitätsauslastung. Ausserdem sei daran erinnert, dass es sich hier um Kostenschätzung der Klasse 5 handelt (siehe «i Einleitung» in Anhang II «Finanztechnische Details»).





**Tabelle 8:** LCOP für CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologische CO<sub>2</sub>-Speicher

| LCOP – CO <sub>2</sub> -Rohrleitungen | LCOP – Geologische CO <sub>2</sub> -Speicher |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| – CHF 21 pro Tonne CO <sub>2</sub>    | – CHF 36 pro Tonne CO <sub>2</sub>           |

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen illustrativ die Investitions- und Betriebskosten für die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur des imaginären CCS-Hubs, die auf der Basis der Annahmen (siehe «ii Annahmen» in Anhang II «Finanztechnische Details») errechnet wurden. Die Beträge sind weder diskontiert noch inflationsbereinigt («money of the day»; MOD).

**Tabelle 9:** Nicht-diskontierte und nicht-inflationsbereinigte Kosten über den Lebenszyklus (Klasse 5 Kostenschätzung) der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungskomponente des CCS-Hubs

| CCS-Hub - Rohrleitungskomponente                                      | Kosten                 | Dauer           |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|
| <b>CAPEX (MOD)</b>                                                    |                        |                 |
| Phase 1 «Engineering and Planning inkl. Bewilligungen / Konzessionen» | CHF 10'000'000         | 5 Jahre         |
| Phase 2 «Konstruktion Bau - Ausheben, Verlegen, Testen»               | CHF 358'776'000        | 3 Jahre         |
| <b>OPEX (MOD)</b>                                                     |                        |                 |
| Phase 3 «Betrieb»                                                     | CHF 607'286'400        | 50 Jahre        |
| <b>Total</b>                                                          | <b>CHF 976'062'400</b> | <b>58 Jahre</b> |

**Tabelle 10:** Nicht-diskontierte und nicht-inflationsbereinigte Kosten über den Lebenszyklus (Klasse 5 Kostenschätzung) für die CO<sub>2</sub>-Speicherkomponente des konzeptionellen CCS-Hubs. Die Explorationsbewilligung wird für die Phase 2, die Konzession nach der Phase 2 für die Phasen 3 bis 6 gewährt.

| CCS-Hub - Speicherkomponente                                 | Kosten                 | Dauer           |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|
| <b>CAPEX (MOD)</b>                                           |                        |                 |
| Phase 1 «Screening Speicherressourcen»                       | CHF 4'000'000          | 2 Jahre         |
| Phase 2 «Charakterisierung - Speicherkomplex»                | CHF 62'000'000         | 4 Jahre         |
| Phase 3 «Erschliessung»                                      | CHF 189'060'000        | 3 Jahre         |
| <b>OPEX (MOD)</b>                                            |                        |                 |
| Phase 4 «Betrieb»                                            | CHF 555'506'000        | 35 Jahre        |
| <i>wovon für kantonale Konzessionsgebühren (Bsp. Kt. TG)</i> | CHF 76'450'000         |                 |
| Phase 5 «Schliessung»                                        | CHF 3'000'000          | 1 Jahr          |
| Phase 6 «Nachsorge»                                          | CHF 11'200'000         | 30 Jahre        |
| <b>Total</b>                                                 | <b>CHF 824'766'000</b> | <b>75 Jahre</b> |



Den Tabellen ist zu entnehmen, dass bis zur Aufnahme des Betriebs mit einem Zeitraum von acht bis neun Jahren gerechnet wird. Erst dann werden erste Einnahmen erzielt («iii Auszüge aus den Cash-flow Modellen» in Anhang II «Finanztechnische Details») Bis die kumulativen Cashflows positiv werden, braucht es aber noch ein paar Jahre mehr: Unter der Annahme konstanter Preise von CHF 21 bzw. CHF 36 pro Tonne CO<sub>2</sub> für die Transport- bzw. Speicherkomponente eines Zertifikats weisen beide Komponenten erst rund 22 Jahre nach Projektbeginn einen positiven kumulativen Cashflow auf (Tabelle 11). Aus unternehmerischer Sicht stellen diese 22 Jahre eine ausserordentlich grosse Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass der ökonomische Mehrwert – gemessen am Net Present Value (NPV) oder an der Internal Rate of Return (IRR) – sehr gering ist und damit kaum ausreicht, um private Akteure zu einem substanziellen Engagement zu bewegen (Tabelle 11).<sup>13</sup>

**Tabelle 11:** Projektökonomische Indikatoren für die Transport- und Speicherkomponente, abgeleitet aus den Cash-flow Modellen (siehe Anhang II «Finanztechnische Details»)

| CCS-Hub                                                      | Rohrleitungskomponente             | Speicherkomponente                 |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 5.69% NPV                                                    | CHF 41'500'000                     | CHF 19'400'000                     |
| 5.69% IRR                                                    | 8.4%                               | 6.5%                               |
| 5.69% LCOP (über eine 35-jährige Betriebsphase)              | CHF 20.5 pro Tonne CO <sub>2</sub> | CHF 36.1 pro Tonne CO <sub>2</sub> |
| Positiver kumulativer Cashflow / Payout (MOD) im Projektjahr | 22                                 | 22                                 |
| Maximales finanzielles Exposure                              | CHF 92'800'000                     | CHF 242'640'000                    |

Unter dem Strich stellen der hohe Finanzbedarf für den Bau und Betrieb der Anlagen, die schwachen projektökonomischen Indikatoren des erwarteten ökonomischen Mehrwerts und die langen Zeithorizonte bis zu positiven kumulativen Cashflows, erhebliche Hindernisse für die Bereitstellung von Kapital durch den privaten Sektor dar. Eine finanzielle Unterstützung durch die öffentliche Hand könnte eine neue Ausgangslage schaffen. Zur Veranschaulichung werden zwei unterschiedliche hypothetische Fördermodelle betrachtet, die grosse technische und ökonomische Risiken zumindest teilweise auf die öffentliche Hand verlagern. Diese Art von Fördermodellen wird im europäischen Ausland sowie in Nordamerika angewendet (für weitere Einzelheiten bezüglich geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher vergleiche Butti et al. (2024) [5]). Ähnlich wie bei den Investitionsbeihilfen des Bundes für die Geothermie, sind Investitions- und Betriebsbeiträge grundsätzlich wieder an den Bund zurückzuerstatten, sofern definierte Profitabilitätskriterien erfüllt werden.

**Fördermodell 1:** Die öffentliche Hand übernimmt 50% der benötigten Investitionskosten für die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur und 100% für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur (CAPEX). Bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung wird ausserdem die Startphase des Betriebs finanziell unterstützt (OPEX). Dieses Modell ist aus Sicht der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung ähnlich wie die Fördermodelle von Dänemark, den USA und Australien. Dort entscheiden Parlamente in den jährlichen Budgetdiskussionen über die Zuteilung der notwendigen Finanzmittel an die relevanten Verwaltungseinheiten wie geologische Landesdienste (Australien, Dänemark) oder Energieministerien (USA).

**Fördermodell 2:** Die öffentliche Hand übernimmt 50% der benötigten Investitionskosten für die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur und für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur (CAPEX). Ausserdem wird

<sup>13</sup> Wenn der Marktpreis für die Transport- und Speicherkomponente eines Zertifikats (wie beispielsweise eines PCRU-Zertifikats) ähnlich wie der errechnete LCOP ist (CHF 57 pro Tonne CO<sub>2</sub>), entspricht der IRR für die beiden Komponenten dem WACC (5.69%). In diesem Fall erzeugt das Unternehmen keinen ökonomischen Mehrwert.



die Startphase des Betriebs finanziell unterstützt (OPEX). Dieses Modell ist ähnlich wie der EU-Innovationsfonds, jedoch mit tieferer Förderquote. Der Finanzbedarf des EU-Innovationsfonds wird aus den Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten aus dem EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) finanziert.

Zusätzlich zur Finanzierung durch Bundesinstanzen fördern die Standortkantone die Errichtung der Infrastrukturen durch einen Verzicht von einmaligen und wiederkehrenden Nutzungsgebühren und Konzessionsgebühren und -abgaben in der Höhe von 15% des OPEX. Siehe «iv Details der Fördermodelle» in Anhang II «Finanztechnische Details» für die detaillierten Angaben und Übersicht der Förderung durch die öffentliche Hand bei beiden Fördermodellen. Bei beiden Fördermodellen übernimmt die öffentliche Hand im Rahmen des «imaginären CCS-Hubs» des illustrativen, konzeptionellen Beispiels für die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung jeweils rund CHF 200 Millionen.

Tabelle 12 zeigt die neue Ausgangslage bei Fördermodell 1 (d.h. Transfers des Fündigkeitsrisikos auf die öffentliche Hand und Beihilfen des Bundes für den Bau und die Anfangsphase des Betriebs) und einer kantonalen Förderung durch Verzicht auf kantonale Gebühren und Abgaben für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung. Die projektökonomischen Indikatoren sind besser: Der kumulative Cashflow ist «schon» 13 Jahre nach Projektbeginn positiv (statt 22 Jahre), sowohl der NPV wie auch der IRR liegen höher und das maximale finanzielle Exposure ist reduziert. Unter diesen Rahmenbedingungen dürfte das Interesse sowie die Investitionsbereitschaft privater Akteure entsprechend höher ausfallen.

**Tabelle 12:** Projektökonomische Indikatoren und nicht-diskontierte und nicht-inflationsbereinigte Kosten über den Lebenszyklus (Klasse 5 Kostenschätzung) für die CO<sub>2</sub>-Speicherkomponente des konzeptionellen CCS-Hubs bei Fördermodell 1

| <b>CCS-Hub – CO<sub>2</sub>-Speicherkomponente mit Fördermodell 1 und Verzicht auf kantonale Abgaben und Gebühren</b> |                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 5.69% NPV                                                                                                             | CHF 141'700'000                    |
| 5.69% IRR                                                                                                             | 22.1%                              |
| 5.69% LCOP (über eine 35-jährige Betriebsphase)                                                                       | CHF 36.1 pro Tonne CO <sub>2</sub> |
| Positiver kumulativer Cashflow / Payout (MOD) im Projektjahr                                                          | 13                                 |
| Maximales finanzielles Exposure                                                                                       | CHF 89'070'000                     |
| <b>CAPEX (MOD)</b>                                                                                                    |                                    |
| Phase 1 «Screening Speicherressourcen»                                                                                | CHF 0                              |
| Phase 2 «Charakterisierung - Speicherkomplex»                                                                         | CHF 0                              |
| Phase 3 «Erschliessung»                                                                                               | CHF 100'990'000                    |
| <b>OPEX (MOD)</b>                                                                                                     |                                    |
| Phase 4 «Betrieb»                                                                                                     | CHF 420'630'100                    |
| <i>wovon für kantonale Konzessionsgebühren (Bsp. Kt. TG)</i>                                                          | <i>CHF 0</i>                       |
| Phase 5 «Schliessung»                                                                                                 | CHF 3'000'000                      |
| Phase 6 «Nachsorge»                                                                                                   | CHF 11'200'000                     |
| <b>Total</b>                                                                                                          | <b>CHF 535'820'100</b>             |



## 2.3 Diskussion

Die Bedeutung der CCS-Technologien für CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen und für die dauerhafte CO<sub>2</sub>-Entfernung ist für die Erreichung einer Netto-Null-Schweiz bis 2050 und darüber hinaus unbestritten. Für eine erfolgreiche Positionierung dieser Technologien im Kohlenstoffmarkt sind sowohl die marktseitigen als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass eine mit der EU kompatible Umsetzung möglich ist. Dies ist deshalb wichtig, weil sowohl die physische Anbindung der Infrastrukturen als auch die ökonomische Inwertsetzung stark von den Zuständen und Entwicklungen in der EU beeinflusst werden. Jedoch sind sowohl die marktseitigen als auch die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines dynamischen Kohlenstoffmarkts, in dem die CCS-Technologien zur Anwendung kommen, heute nicht gegeben.

Zur Schaffung förderlicher und rechtssicherer Rahmenbedingungen ist es sinnvoll, CO<sub>2</sub>, das für die geologische Speicherung bestimmt ist, zu kommodifizieren und vom Abfallrecht abzugrenzen, wie in dem gewählten illustrativen Beispiel vorausgesetzt wurde. Eine griffige *ex-ante* Sektorregulierung und die Einsetzung von Regulatoren, die mit entsprechenden Kompetenzen ausgestattet sind, ermöglichen eine ökonomisch und rechtlich sinnvolle Herausbildung und Bewirtschaftung von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen und geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern.

In einem entsprechenden verankerten Spezialgesetz ist die Klärung der koordinierenden Rolle des Bundes von Vorteil, um planerische Instrumente (z.B. Sachpläne) und die assoziierte Umsetzung über beispielsweise konzentrierende Plangenehmigungsverfahren zu nutzen. Ebenso ist die nationale Bedeutung der relevanten CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen zu unterstreichen, um dem Bund entsprechende Kompetenzen zuzuweisen.

Ein Betriebskonzept für Unternehmen, die in der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur tätig sind, unterscheidet sich stark von dem für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur. Somit ist nicht zu erwarten, dass in der Schweiz ein Unternehmen allein diese beiden Teile der CCS-Wertschöpfungskette abdecken kann. Die Schweiz verfügt jedoch über erfahrene und erfolgreiche Akteure im «Midstream»-Erdgas- und Erdölsektor (Transport und Verteilung). Daher ist eine Ausdehnung der Geschäfte in den CO<sub>2</sub>-Transport mittels Rohrleitungen denkbar und plausibel. In Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung dagegen gibt es in der Schweiz aufgrund des Mangels an materiellen Akteuren mit operativen Aktivitäten aus dem Bergbau und der Exploration und Produktion fossiler Energieträger keine geeigneten industriellen Kandidaten. Auch gibt es in der Schweiz derzeit keine Anbieter, die das vorhandene Speicherpotenzial über geeignete Prospektions-, Explorations- und Erschliessungsarbeiten systematisch in reale Speicherkapazitäten umwandeln können.

Dennoch lassen sich aus den Erfahrungen der Schweiz seit den 2010er Jahren bei der Erkundung nach geothermischen Ressourcen einige wegweisende Erkenntnisse für die Ausnutzung der Rahmenbedingungen gewinnen:

- Der Fokus der Geothermiebranche liegt in der Regel auf kleinskaligen Prospektions-, Explorations- und Erschliessungsprojekten, die die aktuellen kantonalen gesetzlichen Rahmenbedingungen und deren Vollzug für die Nutzung des Untergrunds beeinflussen und so Einfluss auf die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung haben. Die Erfolgsquote in der Exploration und der Erschliessung von schweizerischen Geothermie-Reservoirs ist tief. Gemäss Butti et al. (2024) erhöhen grossskalige Perimeter für Bewilligungen von Prospektionsarbeiten die Erfolgswahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Auffindung von CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten [5]. Bei der Wahl des Perimeters sollte auch berücksichtigt werden, dass CO<sub>2</sub>-Speicher eine grössere räumliche Auswirkung im Untergrund haben als die Geothermie [5]. Daraus folgt, dass Gesuche für Bewilligungen und Konzessionen insbesondere auf deren Perimeter und deren Arbeitsprogramme geprüft werden sollen, um die Erfolgswahrscheinlichkeit zu optimieren.



- Konzeptionell besteht ein grosses Potenzial, Verbundvorteile zu nutzen. So können Prospektions- und Explorationsarbeiten für CO<sub>2</sub>-Speicher und Geothermie-Reservoirs aufeinander abgestimmt werden, da beide in der Regel ähnliche geologische Ziele verfolgen: Wasserführende Gesteinsschichten ab etwa 800 Metern Tiefe [20]. Gleichzeitig können bei der Erschliessung und im Betrieb Nutzungskonflikte vermieden werden. Wird bei der Geothermie in der Regel nach heissen, wasserführenden Gesteinsschichten gesucht, so werden bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung tiefere Gesteinstemperaturen bevorzugt. Weiter werden unterschiedliche Nutzungen konzessioniert: Der Porenraum der Gesteinsschichten für die CO<sub>2</sub>-Speicherung und der Abbau und die Nutzung geothermischer Wärme oder Thermalwasser bei der Geothermie. Daraus folgt, dass bei der Bewilligung und Konzessionierung grundsätzlich eine Überlagerung von Mehrfachnutzungen in unterirdischen Räumen durch unterschiedliche Akteure erlauben soll.
- Die Kernaufgaben der hoheitlichen Aufsicht und deren Vollzug bei der Nutzung der Geothermie in den Tiefen ab rund 800 m Tiefe sind prinzipiell eng verwandt mit denen, die für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung über deren Lebenszyklus in Frage kommen. Formell und materiell sind die Prospektionsarbeiten, die von den kantonalen Behörden bewilligt werden sollen, bei den beiden Nutzungsmöglichkeiten des Untergrunds ähnlich. Ebenso die Bewilligung für das Abteufen von Bohrungen und damit verbundene Arbeiten am Bohrloch. Die Konzessionierung und damit verbundene Aktivitäten erfordern ähnliche Fachkenntnisse, wenn auch der Zweck und die Ziele der Konzession technisch unterschiedlich sind.

In der Folge werden die einzelnen Bausteine des Betriebskonzepts und der Eigentümer- und Finanzierungs-konzepts, die Akteure entlang der CCS-Wertschöpfungskette ausführen, beleuchtet.

**A. Angebot, Value Proposition:** Im Vergleich zu anderen Lösungen ermöglicht die **geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung** die dauerhafte Entfernung grosser Mengen von CO<sub>2</sub>. Wenn das vorhandene Speicherpotenzial der Schweiz erfolgreich in nutzbare Speicherkapazität überführt werden kann, ist der Aufbau einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur auch aus der Perspektive der Eigenständigkeit sinnvoll, da dadurch die Abhängigkeit vom Ausland verringert wird. Allerdings setzt dies im gewählten illustrativen Beispiel voraus, dass CO<sub>2</sub> vom Abfallrecht abgegrenzt und kommodifiziert wird. Denn nur als handelbares Gut kann eine bestätigte Speicherkapazität in Form von Zertifikaten auf den Markt gebracht werden (z.B. als PCRU-Zertifikate). Eine CO<sub>2</sub>-Handelsplattform dient als Verkaufsstelle für die Zertifikate mehrerer CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber an CO<sub>2</sub>-Abscheider. Diese zentrale Struktur vereinfacht die Marktaufsicht im Vergleich zu zahlreichen bilateralen Verträgen. Der **CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport** wiederum stellt das verbindende Glied der CCS-Wertschöpfungskette dar: Der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsbetreiber übernimmt das CO<sub>2</sub> vom CO<sub>2</sub>-Abscheider und liefert es beispielsweise einem geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber. Der CO<sub>2</sub>-Transport via Rohrleitungen ist logistisch sinnvoll und nachhaltig. Die vdz-Studie (2024) zeigt auf, dass der CO<sub>2</sub>-Transportaufwand für eine Million Tonnen CO<sub>2</sub> bei einer Rohrleitung identisch ist mit dem Aufwand für 50 Schiffsladungen (marin) bzw. 250 Binnenschiffe oder 600 Zugladungen mit jeweils 30 Waggons oder 50'000 Tankwagen. [21] Innerhalb der Schweiz dürfte der CO<sub>2</sub>-Transport per Schiff kaum eine Rolle spielen. Dagegen würden zusätzliche Güterzüge im ohnehin stark ausgelasteten Bahnnetz sowie mehr Lastwagen auf den Schweizer Strassen voraussichtlich auf wenig Akzeptanz stossen, da hierfür eine Alternative bestünde.

**B. Zielgruppen:** CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber haben grundsätzlich dieselben Kunden: CO<sub>2</sub>-Abscheider, d.h. Punktemittenten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen und Betreiber von DAC-Technologien. Diese Kundengruppe ist überschaubar, da es in der Schweiz nur rund 30 Punktemittenten gibt, die jährlich zwischen 100'000 und 500'000 Tonnen CO<sub>2</sub> ausstossen, und nicht erwartet wird, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Betreiber von DAC-Technologien entsteht.

**C. Kommunikation, Kanäle und Beziehungen:** Um die Transport- und Speicherinfrastrukturen bedarfsgerecht und zukunftsorientiert bereitzustellen, wird eine effiziente und transparente Kommunikation zwischen den einzelnen Elementen der CCS-Wertschöpfungskette (CO<sub>2</sub>-Abscheider, CO<sub>2</sub>-



Rohrleitungsbetreiber und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherentwickler und -betreiber) notwendig sein. Staatliche Stellen können hierbei eine zentrale Rolle einnehmen. Da die Anzahl Kunden der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber überschaubar sein wird (vgl. B. Zielgruppen oben) und Zertifikate über eine Handelsplattform angeboten werden (vgl. A. Angebot, Value Proposition oben), sind in der Betriebsphase keine besonderen Anstrengungen bezüglich Kommunikation zwischen den Akteuren erforderlich. Eine Aufsichtsbehörde überwacht den Kauf bzw. Verkauf der Zertifikate.

**D. Partner:** CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber werden mit operativen Partnern wie Dienstleistern (z.B. Bau- und Bohrunternehmungen), OEMs und Ingenieurbüros zusammenarbeiten. Diese übernehmen in ihrem Auftrag spezialisierte Tätigkeiten, für die sich der dauerhafte Einsatz eigener personeller Ressourcen nicht lohnt. Des Weiteren stellen Bundesbehörden, kantonale Behörden und Standortgemeinden strategische Partner dar. Einerseits sind sie für die Markt- und die technische Aufsicht zuständig. Andererseits können sie den Aufbau und Betrieb von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur durch den Verzicht auf Konzessionsgebühren und -abgaben sowie durch die Zusage von Fördermitteln unterstützen. Zudem sind die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber selbst operative Partner.

**E. Infrastruktur:** Für die Realisierung der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen bedarf es einer klar definierten koordinierenden Rolle des Bundes, um planerische Instrumente (z.B. Sachpläne) sowie konzentrierende Plangenehmigungsverfahren wirkungsvoll anzuwenden. Die in SAIPEM (2020) [6] vorgestellten zwei Stammstrecken, die in räumlicher Nähe zu den meisten Schweizer Punktemitteln verlaufen, erscheinen aus fachlicher Sicht sinnvoll. Interessanterweise befindet sich gemäss Chevalier et al. (2010) [8] ein Gebiet mit Potenzial für geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Nähe dieser Stammstrecken. Wenn dieses Speicherpotenzial erfolgreich in nutzbare Speicherkapazität überführt werden kann, ist es möglich, die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur nahe an diesen Stammstrecken zu errichten. So können die «Verteilerrohrleitungen» kurzgehalten werden. Auch sind Anschlüsse des Schweizer CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes an Deutschland bei Basel (BS) und an Frankreich / Italien bei Collombey (VS) sinnvoll, da so die Lieferung ins bzw. vom Ausland kontinuierlich stattfinden kann und nicht durch einen Wechsel des Transportmodus unterbrochen wird.

**F. Schlüsselaktivitäten:** Es ist von zentraler Bedeutung, die Schweizer Bevölkerung frühzeitig über den CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport und die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung zu informieren, um einen sachlichen und faktenbasierten Umgang mit der Thematik zu ermöglichen. Diese Aufgabe sollte idealerweise von einer unabhängigen Stelle wahrgenommen werden. Sowohl bei CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- als auch bei geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreibern werden zentrale Schlüsselaktivitäten durch ausgewiesene interne Experten durchgeführt. Für spezialisierte Tätigkeiten werden externe Dienstleister hinzugezogen (vgl. D. Partner oben). Der Wissensaufbau erfolgt sowohl durch «Learning by Doing» als auch durch den gezielten Zukauf von Expertise, indem fachliche Kompetenz externer Dienstleister einbezogen wird. Die Betreiber von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungen verfügen gegenüber den Betreibern geologischer CO<sub>2</sub>-Speicher über einen Wissensvorsprung, da sie auf Praktiken des «Midstream»-Erdgas- und Erdölsektors zurückgreifen können.

**G. Ressourcen und Organisation:** Die Nähe zu bestehenden Rohrleitungsinfrastrukturen des Erdgasbereichs lässt erwarten, dass die schweizerische Industrie innerhalb von vielleicht 10 bis 15 Jahren in der Lage sein wird, die notwendigen personellen und materiellen Ressourcen für den Aufbau einer vergleichbaren CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsinfrastruktur bereitzustellen. Auch der Bau der CO<sub>2</sub>-Speicherungsinfrastruktur und der Aufbau entsprechender Humanressourcen dürften zügig erfolgen, insbesondere wenn Synergien mit der Geothermie genutzt werden. So könnte sich ein dynamisches Portfolio von vielleicht zehn geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern entwickeln, das den über die nächsten 100 bis 200 Jahre notwendigen Bedarf an geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherung abdeckt. Da in der Schweiz nur wenige Fachkräfte über Erfahrung in operativen Aktivitäten des Bergbaus oder der Exploration und Produktion fossiler Energieträger verfügen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass vor allem in den frühen Lebenszyklusphasen auf ausländische Fachkräfte zurückgegriffen wird.





**H. Finanzen:** Für CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber ändert sich die Kostenstruktur in jeder Lebenszyklusphase. Je nach Phase werden Fachkräfte mit unterschiedlicher Expertise benötigt (vgl. auch G. Ressourcen und Organisation oben), weshalb eine Zusammenarbeit mit Dienstleistern Sinn macht. Die Einnahmequellen von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber entstehen durch die Erhebung von Gebühren der von ihnen zu Verfügung gestellten Kapazitäten. Für den geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherbetreiber erfolgt dies für seine zertifizierte Speicherkapazität über den Verkauf von Zertifikaten (vgl. A. Angebot, Value Proposition oben).

**Eigentümerkonzept:** Die Trennung des Eigentums von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetz und geologischen CO<sub>2</sub>-Speichern ergibt sich in erster Linie aus den grundlegend unterschiedlichen Geschäftskonzepten, insbesondere da sich beide Infrastrukturen am Anfang ihres Lebenszyklus befinden. Da keine vertikal integrierten Unternehmen bestehen, können kartell- und wettbewerbsrechtlich heikle Situationen vermieden werden, insbesondere wenn keine Marktaufsichtsbehörde mit den entsprechenden Kompetenzen vorhanden ist. Es ist davon auszugehen, dass der Bau des CO<sub>2</sub>-Rohrleitungsnetzes und der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher mit hoher Wahrscheinlichkeit durch private Pionierunternehmen erfolgt. Die entsprechenden Investitionen werden unter der Annahme getätigt, dass deren Eigentümern (d.h. private Investoren, aber eventuell auch die öffentliche Hand) zukünftige Renditen zufließen. Allerdings ist mit einem entsprechenden Regulierungsrahmen eine eigentumsrechtliche Entflechtung nicht zwingend notwendig, denn auch durch buchhalterische, informationelle oder operationelle Entflechtungen können kartell- und wettbewerbsrechtlich heikle Situationen vermieden werden.

**Finanzierungskonzept:** Der hohe Finanzbedarf für den Bau und Betrieb der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen sowie die langen Zeithorizonte bis zum Erreichen positiver kumulativer Cashflows stellen erhebliche Hindernisse für die Bereitstellung von Kapital durch den privaten Sektor dar. Massnahmen zur Minderung der hohen technischen, ökonomischen, kommerziellen, organisatorischen und politischen Risiken können diesen entgegenwirken. Aus unternehmerischer Sicht sind die finanziellen Auswirkungen einer Förderung erheblich, insbesondere für die Speicherkomponente. Die finanziellen Konsequenzen eines Misserfolgs bei der Entwicklung prospektiver Speicherressourcen in nutzbare Speicherkapazitäten (geologisches Fündigkeitsrisiko) sowie anfängliche Unsicherheiten im Betrieb des Untergrundspeichers werden dabei weitgehend auf die öffentliche Hand übertragen. Wenn der Nachweis nutzbarer CO<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten einmal erbracht ist, sind die ökonomischen und kommerziellen Risiken reduziert: Nachgewiesene Kapazitäten verbessern den Zugang zu Fremdmitteln sowie die Planbarkeit, da sie den Abschluss langfristiger Liefer- und Speicherverträge ermöglichen. Die Gewährleistung von Preisstabilität für die relevanten Zertifikate stellt eine weitere mögliche Massnahme zur Risikominderung aus unternehmerischer Sicht dar.

Die Entwicklung von Geschäftskonzepten ist aktuell aufgrund der fehlenden rechtlichen Rahmenbedingungen und des momentanen Zustands der Kohlenstoffmarkts, dessen Fokus auf der Emissionsminderung an der Quelle liegt, schwierig. Solange es keine Anzeichen dafür gibt, dass sich die Rahmenbedingungen ändern, besteht für private Akteure nur ein geringer Anreiz, in die CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur zu investieren. Einige wenige Akteure zeigen jedoch Bereitschaft, bestehende Geschäftskonzepte, die auf dem Erdgastransport beruhen, in Richtung CO<sub>2</sub>-Transport weiterzuentwickeln. Für eine vollständige CCS-Wertschöpfungskette mangelt es jedoch an Akteuren mit Kernkompetenzen in den Bereichen CO<sub>2</sub>-Abscheidung und geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherung. Ohne entsprechende Geschäftskonzepte, wie sie beispielsweise mithilfe der Anwendung des strategischen Instruments CANVAS entwickelt werden können, ist eine erfolgreiche Markteinführung von CCS-Technologien nur schwer möglich. Aufgrund der hohen Kapitalintensität sowie der langfristigen Ausrichtung der für den Einsatz von CCS-Technologien notwendigen Infrastrukturprojekte benötigen Akteure ein hohes Mass an Planungssicherheit, beispielsweise durch klare rechtliche Rahmenbedingungen und staatliche Beihilfen.



### 3 Schlussfolgerungen und Ausblick

CCS-Technologien – insbesondere der CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport und die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung – sind zentral für das Erreichen der Netto-Null-Ziele der Schweiz bis 2050. Technisch und konzeptionell bestehen heute gute Grundlagen, um in der Schweiz eine funktionsfähige CCS-Wertschöpfungskette aufzubauen. Allerdings stellen die fehlenden marktseitigen und rechtlichen Rahmenbedingungen ein zentrales Hindernis dar. Entsprechend dem gewählten illustrativen Beispiel fehlen ohne eine klare rechtliche Einordnung von CO<sub>2</sub> als handelbares Gut, dessen Abgrenzung aus dem Abfallrecht sowie einer vorausschauenden Sektorregulierung sowohl Investitionsanreize als auch Planungssicherheit für private Akteure.

Die erwartete enge physische Anbindung sowie der Bedarf der Schweiz an Zugang und Nutzung der europäischen CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen verbunden mit der Integration in den europäischen Kohlenstoffmarkt, sprechen für einen autonomen Nachvollzug der europäischen Rahmenbedingungen durch die Schweiz.

In keinem anderen Land erfolgt die Erkundung des Untergrunds ausschliesslich durch private Finanzmittel. Die derzeit hohen ökonomischen und kommerziellen Risiken könnten dadurch reduziert werden, dass die öffentliche Hand insbesondere in den frühen Phasen des Projektlebenszyklus Fördermittel bereitstellt. Auf dieser Grundlage könnte eine tragfähige nationale CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur entwickelt werden.

CCS kann nicht nur zu einem klimapolitischen, sondern auch zu einem industrie- und standortpolitischen Baustein der Schweiz werden. Voraussetzung dafür ist jedoch koordiniertes und entschlossenes Handeln in den kommenden Jahren, um aus dem heutigen konzeptionellen Potenzial eine marktfähige und gesellschaftlich akzeptierte Realität zu machen.

Für das weitere Vorgehen wird empfohlen, die folgenden Vertiefungsthemen zu untersuchen:

**Förderpolitische Massnahmen:** Ausgestaltung und Weiterentwicklung von relevanten Förderinstrumenten für die Planung, den Bau und möglicherweise auch den Betrieb von CO<sub>2</sub>-Rohrleitungs- und geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastrukturen.

**Innovative CCS-Hub-Projekte:** Massnahmen zur Realisierung innovativer Projekte in Bereich CO<sub>2</sub>-Rohrleitungstransport- und geologische CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur umfassen insbesondere die finanzielle Förderung konkreter CCS-Hub-Projekte im industriellen Massstab. Diese Projekte sollen eine Leuchtturmwirkung entfalten und alle Phasen von der Planung über den Bau bis zum Betrieb abdecken. Ziel dabei ist die Entwicklung und Umsetzung Hub-spezifischer innovativer Geschäftskonzepte sowie technologischer Innovationen. Bezüglich des benötigten finanziellen Umfangs kann das in dieser Studie behandelte illustrative, konzeptionelle Beispiel als Referenz herangezogen werden. Ergänzend dazu bieten die jährlichen Ausschreibungen für Netto-Null-Technologien im Rahmen des EU Innovation Fund, die CCS-Projekte ausdrücklich einschliessen, hilfreiche Analogien.

**Grundlagenschaffung:** Vertiefte Analyse der Bedürfnisse in Forschung und Innovation, insbesondere im Bereich der Erkundung, der Entwicklung und des Betriebs einer nationalen geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur, sowie Ableitung von Massnahmen zur Förderung des Verständnisses des Funktionierens einer stärker differenzierten Wertschöpfungskette für den Einsatz von CCS-Technologien (vgl. Exkurs auf Seite 30).

**Behördliche Zuständigkeiten und Aufgabenteilung im CCS-Bereich:** Vertiefung des Verständnisses für den Vollzug behördlicher Aufgaben (z.B. Bewilligungs- und Konzessionierungsverfahren sowie hoheitliche Aufsicht) vor dem Hintergrund der Kompetenzverteilung zwischen Bund, Kantonen und Gemeinden.



## **4 Nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die Projektverantwortlichen haben mit einer Expertengruppe von Personen aus unterschiedlichen Fachgebieten (Vertreter von BFE, BAFU und swisstopo, Volks- und Betriebswirtschaft, Technik und Geologie, Recht) sowie ausgewählten Experten und Autoren von Schweiz-relevanten Studien zu CCS und negativer Emissionstechnologien zusammengearbeitet. So wurden Interviews mit Vertretern von Verbänden (Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG), Fachverband für Wasser, Gas und Wärme (SVGW), Verband der Schweizerischen Cementindustrie (cemsuisse) und Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA)), von einzelnen Industriebetrieben (Ad Terra Consultancy, Ganeos AG, CO2-Kompetenzzentrum in Niederurnen / KVA Linth und CO2 Pipeline Schweiz AG) und von Autorenschaft früherer Berichte (Polynomics AG, Frontier Economics Limited und BAK Economics AG) geführt. Einige dieser Vertreter haben ausserdem ihr Knowhow und Sichtweise im Rahmen eines Workshops eingebracht.

## **5 Publikationen und andere Kommunikation**

Zu diesem Zeitpunkt keine. Mögliche Publikation sind in Bearbeitung.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] 814.310 - Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG), 30. September 2022 (Stand am 1. Januar 2025).
- [2] M. Albicker, M. Eichler, L. Flöer, P. Hader und A. Zwankhuizen, «Carbon Capture & Storage (CCS) - Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050,» Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Basel, 2023.
- [3] G. Butti, G. Siddiqi und U. Keiser, «Exploring and developing (onshore) CO<sub>2</sub> Storage in Switzerland,» Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2023.
- [4] H. Worm, J. Mollet, S. Vaterlaus, J. Reichenbach, H. Sökeland, D. Bothe, A. Wagner, S. Rechsteiner und L. Camenisch, «Optionen zur Regulierung von CO<sub>2</sub>-Pipelines und CO<sub>2</sub>-Untergrundspeichern in der Schweiz,» Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern, 2024.
- [5] G. Butti, U. Keiser und G. Siddiqi, «Konzeption von Förderinstrumenten zur Verkürzung der vorwettbewerblichen Phase für geologische CO<sub>2</sub>-Speicherentwicklung in der Schweiz,» Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2024.
- [6] Saipem, «CO<sub>2</sub>NET – Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO<sub>2</sub> Sammel-Netzwerk in der Schweiz,» Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2020.
- [7] Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG ..., 23. April 2009.
- [8] aaec International - The Authority for Total Cost Management, «Cost Estimate Classification System - As Applied for the Petroleum Exploration and Production Industry, TCM Framework: 7.3 – Cost Estimating and Budgeting, International Recommended Practice No. 87R-14,» Rev. 10 March 2015.
- [9] G. Chevalier, L. W. Diamond und W. Leu, «Potential for deep geological sequestration of CO<sub>2</sub> in Switzerland: a first appraisal,» Swiss Journal of Geosciences, Bd. 103, p. 427–455, 2010.
- [10] D. Giardini, G. Guidati, F. Amann, T. Driesner, V. Gischig, L. Guglielmetti, M. Hertrich, K. Holliger, R. Krause, L. Laloui, O. Lateltin, B. Lecampion, S. Löw, H. Maurer, M. Mazzotti, P. Meier, A. Moscariello, M. O. Saar, M. Spada, B. Valley, S. Wiemer und A. Zappone, «Swiss Potential for Geothermal Energy and CO<sub>2</sub> Storage, Synthesis Report,» ETH Zurich, 2021.
- [11] BAFU, «Faktenblatt - CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung: Übersicht zum rechtlichen Rahmen,» 1. Mai 2025.
- [12] 641.71 - Bundesgesetz über die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Gesetz), Änderung vom 15. März 2024.
- [13] Energy Sector Planning and Analysis (ESPA), «A Review of the CO<sub>2</sub> Pipeline Infrastructure in the U.S.,» U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Office of Fossil Energy, 21.4.2015.
- [14] V. Becattini, P. Gabrielli, C. Antonini, J. Campos, A. Acquilino, G. Sansavini und M. Mazzotti, «Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and



environmental performance of infrastructure rollout,» International Journal of Greenhouse Gas Control, Juni 2022.

- [15] M. Gisler, «Die Schweizerische Gasindustrie 1850-2020,» Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG, Zürich, 2020.
- [16] Stadt Zürich, Zürich stimmt ab - Abstimmungsunterlagen, 22. September 2024.
- [17] M. D. Solomon, M. Scheffler, W. Heineken, M. Ashkavand und T. Birth-Reichert, «Pipeline Infrastructure for CO<sub>2</sub> Transport: Cost Analysis and Design Optimization,» Energies, Bd. 17 (12) 2911, 2024.
- [18] R. S. Middleton, S. P. Yaw, B. A. Hoover und K. M. Ellett, «SimCCS: An open-source tool for optimizing CO<sub>2</sub> capture, transport, and storage infrastructure,» Environmental Modelling & Software, Bd. 124, February 2020.
- [19] S. M. Smith, O. Geden, M. J. Gidden, W. F. Lamb, G. F. Nemet, J. C. Minx, H. Buck, J. Burke, E. Cox, M. R. Edwards, S. Fuss, I. Johnstone, F. Müller-Hansen, J. Pongratz, B. S. Probst, S. Roe, F. Schenuit, I. Schulte und N. E. Vaughan, «The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition».
- [20] IEAGHG, «Prospective Integration of Geothermal Energy with Carbon Capture and Storage (CCS),» 2023.
- [21] vdz, «Anforderungen an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Deutschland - Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung,» Düsseldorf, 2024.
- [22] Negative Emissions Platform, «Policy Brief - Carbon Removal and Carbon Farming Regulation,» 2024.
- [23] A. Osterwalder und Y. Pigneur, Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers, Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [24] Verordnung (EU) 2024/3012 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO<sub>2</sub>-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landwirtschaft und der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Produkten, 27. November 2024.
- [25] Shell PLC, Sustainability Report 2023.
- [26] Shell Canada Limited, Quest Carbon Capture and Storage Project - 2022 Annual Status Report, Calgary, Alberta, Canada.
- [27] Society of Petroleum Engineers, «CO<sub>2</sub> Storage Resources Management System (SRMS),» 2017.
- [28] IEAGHG, «The Role of Indices in Assessing the Maturity of CCUS Technologies and their Readiness for Deployment», Technical Report 2024-01,» February 2024.
- [29] Alberta Energy Regulator, «Alberta Energy Outlook 2025 (ST98),» Calgary, Alberta, Canada, 2025.
- [30] 641.711 - Verordnung über die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Verordnung), 30. November 2012 (Stand am 1. Januar 2026).



## **7 Anhang**

Für den vorliegenden Bericht wurden folgende zwei separate Dokumente erstellt:

Anhang I «Rechtliche Aspekte»

Anhang II «Finanztechnische Details»