

DemoUpCARMA in Kürze

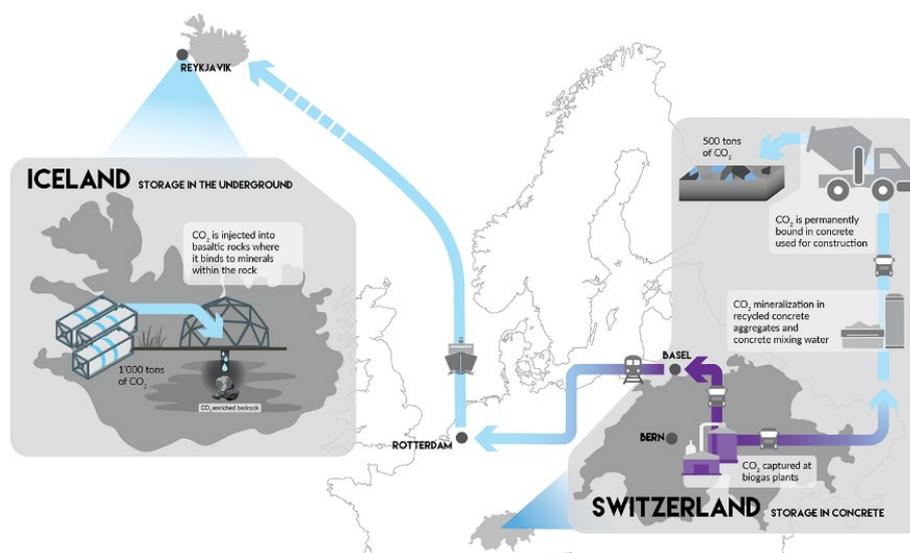
DemoUpCARMA (Demonstration and Upscaling of CARbon dioxide MAnagement solutions for a net-zero Switzerland) ist ein von der ETH Zürich geleitetes Pilotprojekt. Es hatte zum Ziel, zwei Pfade umzusetzen, die zur dauerhaften Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre oder zur Vermeidung von CO₂-Emissionen führen:

- Nutzung und permanente Speicherung von CO₂ in Abbruchbeton in der Schweiz mittels eines neuen Verfahrens.
Dieser Pfad wird als CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilisation and Storage) bezeichnet. CCUS steht für die Abscheidung, den Gebrauch und die Speicherung von CO₂.
- Transport und permanente Speicherung von CO₂ in einem geologischen Reservoir im Ausland.
Dieser Pfad wird als CCTS (Carbon dioxide Capture, Transport and Storage) bezeichnet. Damit ist die Abscheidung, der Transport und die Speicherung von CO₂ gemeint.

DemoUpCARMA untersuchte unter Berücksichtigung technologischer, wirtschaftlicher, regulatorischer, politischer und gesellschaftlicher Aspekte, wie diese Pfade mittel- bis langfristig optimal gestaltet und skaliert werden können. Um die Treibhausgasemissionen der Schweiz bis 2050 auf Netto-Null zu reduzieren und die Klimaziele des Landes zu erreichen, ist die Erzeugung negativer Emissionen ein unerlässlicher Bestandteil. Die Energieperspektiven 2050+ gehen davon aus, dass jährlich 12 Millionen t CO₂ anfallen, die als schwer vermeidbar gelten, z. B. aus Kehrichtverbrennungsanlagen oder der Landwirtschaft. Davon müssen voraussichtlich 7 Millionen t CO₂ mit Negativemissionen ausgeglichen werden.

DemoUpCARMA wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert und unterstützt. Im Projekt wirkten 24 Partner aus Wissenschaft und Industrie mit, die teils weitere finanzielle Mittel sowie Sachleistungen einbrachten. Siehe auch www.demoupcarma.ethz.ch.

Weitere Auskünfte: Prof. Marco Mazzotti (marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch), Dr. Viola Becattini (viola.becattini@ipe.mavt.ethz.ch), Projektleitung, Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich



CO₂-Speicherung in Abbruchbeton in der Schweiz

Im Rahmen von DemoUpCARMA hat das 2019 gegründete ETH-Spin-off Neustark sein Verfahren zur dauerhaften Speicherung von CO₂ in rezykliertem Betongranulat und Betonmischwasser weiterentwickelt und im industriellen Massstab getestet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die für die CO₂-Speicherung notwendige Infrastruktur in einem bestehenden Betonrecyclingwerk einbauen und industriell betreiben lässt. Für die Speicherung wird Betongranulat, das beim Abbruch (z. B. von Gebäuden) entsteht, mit biogenem CO₂ von der ARA Bern versetzt. Das CO₂ mineralisiert, bildet Kalziumkarbonat, und bleibt damit dauerhaft gespeichert; einzig Temperaturen von über 600°C oder sehr starke Säuren vermögen das so gebundene CO₂ wieder freizusetzen. Die Mineralisierung sorgt dafür, dass das CO₂ im Betongranulat gespeichert bleibt, auch wenn dieses nach der Wiederverwendung im Strassenbau oder in frischem Recyclingbeton beigemischt, verbaut und anschliessend wieder abgerissen wird. Pro Tonne rezyklierten Betongranulat können rund 13 kg CO₂ gebunden werden. Labortests der Empa zeigen zudem, dass Beton, welcher karbonatisiertes rezykliertes Betongranulat enthält, eine höhere Druckfestigkeit als Primärbeton aufweist. Dies birgt das Potential den Zementgehalt und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Betonmischwasser ist ein Nebenprodukt, das bei der Reinigung von Betonmischfahrzeugen und Betonmischanlagen anfällt. Es setzt sich aus Wasser und einem Feststoffgehalt (hauptsächlich Zement und Sand) von weniger als 10 % zusammen. Das Betonmischwasser wird in einem Becken gesammelt und dem Fertigbeton als Wasserersatz beigemischt. Es kann rund 25 kg CO₂ pro Kubikmeter aufnehmen. Die Beimischung von karbonatisiertem Betonmischwasser zu Primärbeton zeigte im Labor eine verbesserte Verarbeitbarkeit und ebenfalls eine erhöhte Druckfestigkeit gegenüber Primärbeton, welchem unkarbonatisiertes Betonmischwasser zugefügt wurde.

Sowohl die Speicherung von CO₂ in rezykliertem Betongranulat als auch in Betonmischwasser weist eine positive Klimawirkung auf. Es werden mehr Emissionen vermieden und durch den Einsatz von biogenem CO₂ wie in DemoUpCARMA, mehr Emissionen beseitigt als erzeugt. Die Wirkungsgrade (Verhältnis von Nutzenergie zu zugeführter Energie) lagen bei über 90 %. Bezüglich der Kosten zeigt sich ein Skaleneffekt: mit einer integrierten Speicheranlage lassen sich ab einer Menge von 500 t gespeichertem CO₂ längerfristig die Kosten senken.

Weitere Informationen zu diesem Pfad finden sich unter anderem im Blogbeitrag [«Wie sich der CO₂-Fussabdruck von Beton schon heute verkleinern lässt»](#).

Weitere Auskünfte: Dr. Johannes Tiefenthaler (johannes.tiefenthaler@neustark.com), Gründer und Co-CEO, Neustark AG

CO₂-Speicherung in einem geologischen Reservoir in Island

Das DemoUpCARMA-Projekt demonstrierte erstmals eine CO₂-Lieferkette von der Abscheidung, über den Transport bis hin zu einer geologischen Speicherung im isländischen Basalt. Bei der ARA Bern wird biogenes CO₂ abgeschieden und verflüssigt. Von dort gelangt es in speziellen Containern per Lastwagen nach Weil am Rhein (D), wo es anschliessend per Bahn zum Hafen von Rotterdam (NL) und weiter per Seefracht nach Island transportiert wird. In Island wird der Container vom Hafen per Lastwagen zum geologischen Reservoir transportiert.

Bisher wurden 80 t CO₂ nach Island transportiert. Eine Lebenszyklusanalyse hat ergeben, dass die gesamte Lieferkette deutlich weniger Treibhausgasemissionen verursacht als mittels der geologischen Speicherung vermieden werden. Das heisst, obwohl beim Transport zusätzliche Emissionen anfallen, ist die CO₂-Bilanz am Ende positiv. Handelt es sich wie bei unserem Pilotprojekt um biogenes CO₂, können sogar negative Emissionen entstehen. Pro gespeicherter Tonne CO₂ werden etwa 200 bis 250 kg CO₂-Emissionen generiert. Somit lassen sich 750 bis 800 kg CO₂ netto speichern. Am meisten Emissionen verursacht der Transport mit fossilen Brennstoffen, was sich etwa durch den Einsatz erneuerbaren Energien im Zugverkehr oder die Errichtung eines CO₂-Pipelinenetzes künftig optimieren liesse.

In Island wird das Schweizer CO₂ mit Meerwasser vermischt und durch ein eigens erstelltes Bohrloch in 300 bis 400 Meter Tiefe in den basaltischen Untergrund injiziert. Bisher löste die Partnerfirma Carbfix das CO₂ in Süsswasser auf, um es unterirdisch zu mineralisieren. Nun wird mit einem umfangreichen Überwachungsnetzwerk untersucht, ob das Verfahren und die Mineralisierungsprozesse auch mit Meerwasser funktionieren, und wie genau die Mineralisierung abläuft. Aufgrund erschwerter Lieferbedingungen durch die Pandemie und den Krieg in der Ukraine verzögerten sich Transport und Materialbeschaffung. Zudem kamen die Bohrungen wegen technischer Probleme langsamer voran als ursprünglich erhofft. Daher konnte erst Anfang November 2023 mit den Injektionen begonnen werden, so dass bisher nur wenige Ergebnisse vorliegen. Das Partnerprojekt DemoUpStorage begleitet und überwacht die Injektion und die CO₂-Mineralisierung im Reservoir bis Ende 2024.

Die im Projekt berechneten Kosten belaufen sich auf mehrere hundert Schweizer Franken pro Tonne gespeichertes CO₂. Diese Kostenkalkulation ist jedoch vor dem Hintergrund des Pilotcharakters des Projekts zu sehen. Die damit verbundenen Herausforderungen dürften die Kosten erhöht haben. In Zukunft könnten sich Skaleneffekte, ein etablierter regulatorischer Rahmen und mehr Erfahrung im Transportmanagement kostensenkend auswirken.

Weitere Informationen zu diesem Pfad finden sich unter anderem im Blogbeitrag [«Test eines neuen Verfahrens: erste Injektion von in Meerwasser gelöstem CO₂ in Basalte in Island»](#).

Weitere Auskünfte: Prof. Stefan Wiemer (stefan.wiemer@sed.ethz.ch), Direktor, Schweizerischer Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich

Transport und Finanzierung

Der Transport von der Emissionsquelle zum Speicherort ist ein zentrales Element von CCT(U)S. Im Rahmen des Projekts funktionierte der Aufbau einer realen Lieferkette von der Abscheidungsanlage bis zum Betonrecyclingwerk reibungslos. Die grenzüberschreitende Lieferkette nach Island brachte hingegen einige Herausforderungen mit sich, die durch eine reine Modellierung kaum ersichtlich geworden wären. Eine Schwierigkeit bestand beispielsweise in der Deklaration des auszuführenden CO₂ und damit zusammenhängenden Regulatorien.

Die Tatsache, dass sich die Herausforderungen je nach Lieferkette unterscheiden, verdeutlichten die zwei von DemoUpCARMA untersuchten Fallbeispiele: Für die Kehrichtverbrennungsanlage Hagenholz (Zürich) und die Zementanlage Jura in Wildeggen wurden unterschiedliche Lösungen für Abscheidungsverfahren und -anlagen geprüft. Es zeigte sich, dass für die Wahl einer Abscheidungstechnologie ausschlaggebend ist, welche Energieressourcen (z. B. Wärme oder Strom) am Standort bereits verfügbar sind oder effektiv eingesetzt werden können.

Hinsichtlich der Kosten ist die aktuell etablierte multimodale Transportkette (mit Lastwagen, Bahn und Schiff) für CCTS relativ teuer und bietet voraussichtlich wenig Skaleneffekte. Eine wesentliche Kosten- und Emissionsreduktion könnte wohl nur langfristig durch den Bau eines Pipelinetzwerks eintreten. Für die Errichtung derartiger CO₂-Pipelines müssten aber erst rechtliche Grundlagen auf Kantons- oder Bundesebene geschaffen werden, wobei für letztere eine Verfassungsänderung notwendig wäre. Die hohen Finanzierungs- und Zinskosten eines derartigen Grossprojekts wären am geringsten, wenn die öffentliche Hand sie stemmen könnte. Dafür müssten aber zunächst ebenfalls die rechtlichen Grundlagen geschaffen werden und es bedarf einer politischen Mehrheit. Alternativ wären auch Bürgschaften oder Garantien durch den Bund prüfenswert. Die Investitionskosten liessen sich möglicherweise senken, wenn sich ein Modell etablieren würde, bei dem sich verschiedene CO₂-Verursacher zu einem Verbund zusammenschliessen, um Synergieeffekte beim Transport und der Speicherung zu nutzen.

Für die Verwaltung und den Betrieb eines solchen Netzes erscheint ein reguliertes Geschäftsmodell mit einer zentralen Betreibergesellschaft als am zielführendsten. Dieses böte niedrige Finanzierungskosten, Anreize für einen effizienten Betrieb und die Flexibilität, sich mit den Veränderungen des regulatorischen Umfelds im Laufe der Zeit weiterzuentwickeln. Momentan existieren noch keine tragfähigen Geschäftsmodelle für CCT(U)S in der Schweiz. Fehlende oder unklare regulatorische Leitplanken behindern derzeit die Marktentwicklung. Es gilt daher, Mechanismen zur Klimafinanzierung für spezifische Anwendungsfälle zu entwickeln. Für Betreiber von Anlagen mit hohen Treibhausgasemissionen, die am Schweizer EHS teilnehmen, wäre beispielsweise die Anrechnung von CCT(U)S-Massnahmen ein wichtiges Element, um zusätzliche Investitionen zu generieren. Dies ist in der laufenden Revision des CO₂-Gesetzes vorgesehen.

Mit CCT(U)S lässt sich bereits heute eine positive Klimabilanz erzeugen, wie die durchgeführten Lebenszyklusanalysen zeigen. Unabhängig vom gewählten Transport- und Abscheidungsverfahren sind die dabei anfallenden Emissionen geringer als die gespeicherte Menge an CO₂.

Akzeptanz

Zukünftige CCT(U)S-Projekte müssen nicht nur finanziert und reguliert, sondern auch von Politik und Gesellschaft mitgetragen werden. Eine im Rahmen von DemoUpCARMA durchgeführte repräsentative Umfrage zeigt, dass die Schweizer Bevölkerung derzeit wenig über CCT(U)S weiss. Daraus ergibt sich ein grosser Informationsbedarf insbesondere in Bezug auf die konkrete Umsetzung. Die wahrgenommenen Vorteile und Risiken unterscheiden sich für die beiden untersuchten CO₂-Speicherpfade und sind somit stark kontextspezifisch. Die Akzeptanz wird von persönlichen Faktoren wie der generellen Einstellung zum Klimawandel oder der politischen Orientierung beeinflusst. Grössere Unterstützung erhalten Initiativen, die von vertrauenswürdigen Akteuren vorangetrieben werden, wobei die Wissenschaft an erster Stelle steht, gefolgt von Behörden und NGOs.

Die Ergebnisse eines repräsentativen Online-Experiments deuten zudem darauf hin, dass Personen eher bereit sind die Kosten für CCT(U)S zu tragen, wenn eine langfristige Speicherung gewährleistet ist. Die Befragten legen Wert darauf, dass eine Lagerung im Ausland hohen Sicherheitsstandards genügt und von der lokalen Bevölkerung akzeptiert wird. Angesichts der anstehenden Herausforderungen für die Umsetzung von CCT(U)S-Initiativen sind eine frühzeitige Einbindung von verschiedenen Interessensgruppen und eine transparente Informationspolitik wichtig, um Akzeptanz schaffen zu können.

Eine Stakeholderbefragung hat zudem gezeigt, dass kritische Stimmen aufkommen könnten, sobald CCT(U)S Initiativen tatsächlich umgesetzt oder aufskaliert werden. Es ist daher wichtig, verschiedene Interessensgruppen möglichst früh einzubinden. Gleichzeitig besteht unter den direkt involvierten Stakeholdern ein grosses Problem- und Handlungsbewusstsein, das im Zuge von DemoUpCARMA weiter geschärft wurde.

Auskünfte: Dr. Michèle Marti (michele.marti@sed.ethz.ch), Leiterin Kommunikation und Forschungsgruppe Risikokommunikation, Schweizerischer Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich

Schlussfolgerungen

DemoUpCARMA hat für zwei Pfade zur dauerhaften CO₂-Speicherung aufgezeigt, dass sie technisch machbar sind und eine positive Klimabilanz aufweisen. Der Demonstrationscharakter des Projekts hatte im Vergleich zu einer reinen Modellierung den Vorteil, unerwartete Herausforderungen als auch praktikable Lösungen aufzuzeigen. Darüber hinaus trug DemoUpCARMA dazu bei, neues Wissen über CCT(U)S zu erschaffen und zu vermitteln sowie relevante Stakeholder zusammenzubringen, die nun gemeinsam Nachfolgeprojekte anregen. Durch die Fokussierung auf die Skalierung von CCT(U)S-Initiativen konnte DemoUpCARMA auch eine Reihe von Herausforderungen aufzeigen, die im Folgenden aufgelistet werden:

- Für eine tragfähige und finanzierbare Umsetzung von grossskaligen CCT(U)S-Initiativen fehlt es an etablierten Rahmenbedingungen.
- Derzeit besteht für Schweizer CO₂-Versuacher kein belastbares Geschäftsmodell für CCT(U)S.
- Es ist unklar, ob und unter welchen Bedingungen die Schweizer Bevölkerung konkrete CCT(U)S Initiativen unterstützt oder ablehnt.

Basierend auf den Projekterkenntnissen sieht das Projektteam insbesondere in folgenden Bereichen Handlungsbedarf:

- Verbesserung der Planungssicherheit insbesondere im Hinblick auf die regulatorischen Rahmenbedingungen.
- Schaffung von finanziellen Anreizsystemen oder Fördermassnahmen, um CCT(U)S-Initiativen zu etablieren.
- Ernennung einer Instanz für die Entwicklung eines Pipelinesystems, um diese Option zum Transport grosser Mengen an CO₂ zu verfolgen.
- Durchführung von Pilotstudien mit mobilen Abscheidungseinheiten zur praktischen Erprobung verschiedener Verfahren.
- Planung und Realisierung von grossangelegten CO₂-Abscheidungsanlagen für bedeutende Emissionsquellen.
- Kontinuierliche Forschung und regelmässige Aktualisierung von Lebenszyklusanalysen und technisch-ökonomischen Analysen.
- Aktive Einbindung von verschiedenen Interessensgruppen und der Bevölkerung in die Bewertung, Planung und Umsetzung von CCT(U)S-Initiativen.

Auskünfte: Prof. Marco Mazzotti (marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch), Projektleitung, Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich
