

SZENARIENANALYSEN FÜR DIE ERREICHUNG DES SCHWEIZER NETTO-NULL ZIELS IN 2050

Gianfranco GUIDATI¹, Regina BETZ² et al.

Motivation und zentrale Fragestellung

Die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 Netto-Null Treibhausgasemissionen zu erreichen, inklusiv dem internationalen Flugverkehr. Gemäss den Energieperspektiven 2050+ werden um die 12 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr als schwer vermeidbare Emissionen verbleiben, mit dem Flugverkehr sogar 29 Millionen Tonnen. Um diese ambitionierten Klimaziele zu erreichen, sind erhebliche Investitionen in Carbon Management Technologien (CMT) nötig, einschliesslich Carbon Capture and Storage/Utilization (CCS/CCU) und verschiedener Negativemissionstechnologien (NET).

Die zentrale Fragestellung der Studie [1] lautet daher: Welche CMT-Technologien sollten unter welchen Rahmenbedingungen in der Schweiz implementiert werden, um das Netto-Null-Ziel kosteneffizient zu erreichen? Die Studie untersucht vier narrative Zukunftsszenarien – Octopus, Butterfly, Clam und Snail – die sich hinsichtlich Innovationsgrad, internationaler Kooperation und Emissionskompensationsstrategie unterscheiden. Ziel war es, politischen Entscheidungsträgern Orientierung bei der Einführung geeigneter Politikinstrumente zu geben und die CMT-Implementierung in der Schweiz zu unterstützen.

Methodisches Vorgehen

Die Modellierung erfolgt mit dem Swiss Energyscope Model (SES-ETH) der ETH Zürich, einem linearen Optimierungsmodell des Energiesystems. Das Modell minimiert die jährlichen Gesamtkosten des Energiesystems unter Berücksichtigung der Endenergienachfrage, Technologieeffizienz und -kosten sowie der Verfügbarkeit von Energieressourcen. Alle Ergebnisse beziehen sich auf das Zieljahr 2050 und bauen auf den SWEET-CROSS-Szenarien auf, die entlang dreier Dimensionen variiert wurden: (1) Klimapolitik (inländische versus internationale Kompensation), (2) Energiemarktintegration (hohe versus niedrige Integration mit der EU) und (3) Technologieeinsatz (innovativ versus konservativ).

Die vier entwickelten Narrative repräsentieren unterschiedliche Zukunftsentwicklungen: Das **Octopus-Narrativ** beschreibt umfassende Innovation und internationale Kooperation mit niedrigen CO₂-Transport- und Speicherkosten (100-200 CHF/tCO₂). Das **Butterfly-Narrativ** umfasst ebenfalls hohe Innovation und Kooperation, jedoch ohne internationale Kompensation. Das **Clam-Narrativ** charakterisiert begrenzte Innovation und Kooperation mit sehr hohen CO₂-Transport- und Speicherkosten (800-1600 CHF/tCO₂). Das **Snail-Narrativ** beschreibt verzögerte Innovation und Kooperation mit mittleren Kosten (400-800 CHF/tCO₂).

Das Modell berücksichtigt explizit den internationalen Flugverkehr und nimmt an, dass bis 2050 70% der Flugkraftstoffe aus nachhaltigen Treibstoffen (SAF) bestehen. Verschiedene CMT-Optionen wurden untersucht: CO₂-Speicherung als Gas im Untergrund (CCS), als fester Kohlenstoff (Hydrokohle, Pflanzenkohle), als Holz in Bauwerken sowie CO₂-Nutzung (CCU).

Ergebnisse

Die Modellierungsergebnisse zeigen signifikante Unterschiede in den Grenzvermeidungskosten zwischen den Narrativen: von 200 CHF/tCO₂ (Octopus) bis 1280 CHF/tCO₂ (Clam). Dies verdeutlicht, dass CMT im Vergleich zu Emissionsreduktionen in Sektoren wie Verkehr oder Wärme deutlich teurer sind und ihr Einsatz daher nur für die schwer vermeidbaren Emissionen verwendet werden sollte (siehe Abb. 1).

¹ ESC ETH Zürich, Sonneggstrasse 28, 8006 Zürich [+41 44 632 97 83](mailto:gianfranco.guidati@esc.ethz.ch), gianfranco.guidati@esc.ethz.ch, [Dr. Gianfranco Guidati | ETH Zurich](https://www.ethz.ch/en/people/employees/gianfranco-guidati.html)

² CEE ZHAW, Gertrudstrasse 8, 8401 Winterthur, [+41 \(0\) 58 934 49 54](mailto:betz@zhaw.ch), betz@zhaw.ch, [Prof. Dr. Regina Betz | ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften](https://www.zhaw.ch/en/people/prof-dr-regina-betz.html)

Technologien für alle Narrative: Die Speicherung von CO₂ in Holz durch vermehrte Holzbauweise wird in allen Szenarien bis zum angenommenen Maximum von 2 Mt CO₂ /a ausgeschöpft und erweist sich als kosteneffiziente No-Regret-Option. Ebenso essenziell ist die Trennung von CH₄ aus Abfall-, Abwasser- und Landwirtschaftsprozessen (biologische und hydrothermale Verfahren). Die Importstrategie für nachhaltige Flugkraftstoffe (70% SAF-Quote bis 2050) ist für alle Narrative zentral.

CO₂-Abscheidung aus Punktquellen: In den Octopus-, Butterfly- und Clam-Narrativen spielt die CO₂-Abtrennung aus grossen Punktquellen (Zementwerke, Kehrverbrennungsanlagen) eine wichtige Rolle, wobei 2,2 bis 7,5 Mt CO₂ /a abgeschieden und gespeichert werden. Im Snail-Narrativ wird die CO₂-Abscheidung aus Punktquellen aufgrund hoher Transportkosten kaum genutzt. **Feste Kohlenstoffspeicherung:** Pflanzkohle wird in allen Narrativen genutzt, jedoch in unterschiedlichem Umfang – besonders stark im Clam- (5 Mt/a) und Snail-Narrativ (2,5 Mt/a), weniger im Octopus- (0,5 Mt/a) und Butterfly-Narrativ (0,7 Mt/a). **CO₂-Pipeline:** Eine Pipeline für den CO₂-Transport ins Ausland erweist sich in den Octopus-, Butterfly- und Snail-Narrativen als kritisch für kosteneffizienten Klimaschutz. Frühzeitige Investitionen in diese Infrastruktur sind entscheidend. Im Clam-Narrativ fehlt diese Infrastruktur, was zu drastisch höheren Kosten führt. **CO₂-Nutzung (CCU):** CCU wird nur im Clam-Narrativ relevant (2,9 Mt/a), da hier die hohen CO₂-Speicherkosten alternative Lösungen erfordern. Dies ist jedoch mit einem massiven zusätzlichen Strombedarf von 20 TWh/a für die Elektrolyse verbunden und erscheint unter konservativen Annahmen unrealistisch.

Internationale Kompensation: In den Octopus- und Snail-Narrativen werden etwa 6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr durch internationale Kompensationsmechanismen ausgeglichen, was die Bedeutung funktionierender internationaler Kohlenstoffmärkte unterstreicht.

Die Studie identifiziert kritische Politikbereiche: Förderung von Holzbau, Unterstützung der SAF-Entwicklung, CCS Förderung in Zement- und Abfallverbrennungsanlagen, Entwicklung einer CO₂-Pipeline, Standardisierung von Pflanzkohle-Regulierung sowie Ausbau der internationalen Zusammenarbeit bei Kohlenstoffmärkten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass verzögerte Infrastrukturplanung und regulatorische Hürden die Technologieeinführung behindern, Kosten erhöhen und die politische Unterstützung schwächen können.

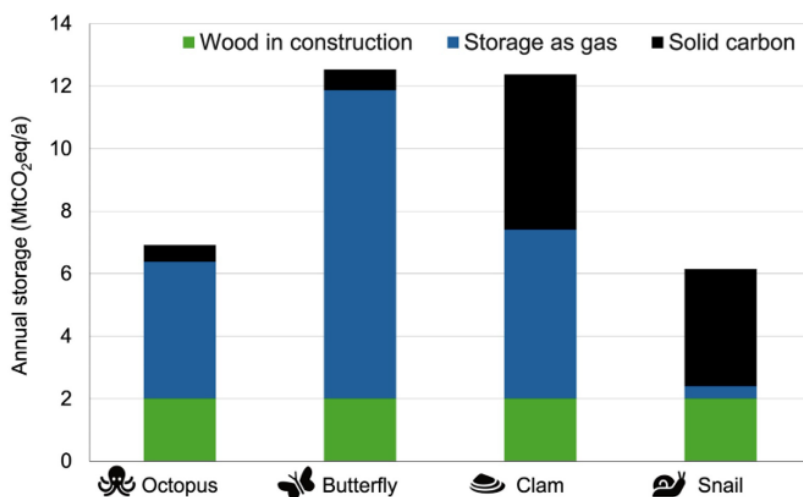


Abbildung 1: Unterschiedliche Speicherungsformen für die verschiedenen Szenarien

Referenzen

- [1] Guidati, G., Marchand, C., Castro, P., Winkler, M., Landis, F., Honegger, M., & Betz, R. (2024). Future use of Carbon Management to achieve Emissions Reductions and Removals in Switzerland: Scenario and Modeling Analysis. <https://decirra.ch/download/decirra-sp3-scenario-report-dec-2024/>.