



Bern, 2. September 2020

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Bericht des Bundesrates
in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens
Goumaz vom 12. Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	3
1.1	Auftrag	3
1.2	Negative Emissionen sind unverzichtbar für eine globale Erwärmung um maximal 1,5 Grad	3
1.3	Die Schweiz soll bis 2050 ihre Treibhausgasemissionen auf Netto-Null absenken	5
2	Potenzial von Negativemissionstechnologien für die Schweiz	7
2.1	Einordnung der Begriffe	7
2.2	Potenzial für die Schweiz und Stand der Entwicklungen	12
2.3	Zwischenfazit zum Potenzial für die Schweiz	24
3	Handlungsoptionen	25
4	Fazit	26
	Anhang: Abkürzungen	29

1 Ausgangslage

1.1 Auftrag

Der Wortlaut des Postulats 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018 ist: «Der Bundesrat wird beauftragt, einen Bericht vorzulegen, der aufzeigt, von welcher Bedeutung negative CO₂-Emissionen (Abscheidung und Speicherung sowie Nutzung von CO₂) für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein könnten.» In der Begründung hält die Postulantin fest, dass gemäss dem Weltklimarat (IPCC) Massnahmen zur Abscheidung und Speicherung bzw. zur Nutzung von CO₂ unabdingbar sind, wenn die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius beschränkt werden solle. Die technischen und finanziellen Herausforderungen im Zusammenhang mit negativen Emissionen seien jedoch gross. Entsprechend müssten das Potenzial sowie die Chancen und Risiken negativer Emissionen beurteilt werden. Negative Emissionen dürften jedoch in keiner Weise die Bemühungen um die Reduktion der CO₂-Emissionen ersetzen.

Der Bundesrat anerkennt die Notwendigkeit einer solchen Analyse, insbesondere angesichts der Rolle, die die Wissenschaft diesen Technologien für die Erreichung der international vereinbarten Klimaziele zuschreibt, und beantragte am 20. Februar 2019 die Annahme des Postulats. Der Nationalrat hat daraufhin das Postulat am 22. März 2019 zur Beantwortung überwiesen.

1.2 Negative Emissionen sind unverzichtbar für eine globale Erwärmung um maximal 1,5 Grad

Unter dem Klimaübereinkommen von Paris vom Dezember 2015¹ hat sich die Staatengemeinschaft zum Ziel gesetzt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen und eine Erwärmung auf maximal 1,5 Grad Celsius anzustreben. Letzteres würde die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels deutlich reduzieren.

Der Sonderbericht des UNO-Klimabeirats (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) vom Oktober 2018 über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 Grad Celsius gegenüber vorindustriellem Niveau² hat die grossen Vorteile einer Begrenzung auf 1,5 Grad gegenüber 2 Grad für Mensch und Umwelt aufgeführt. So wären Bedrohungen wie Wetterextreme, Artenverlust, und die Versauerung der Meere sowie Risiken für die menschliche Gesundheit, Nahrungssicherheit und Wasserversorgung deutlich geringer bei 1,5 Grad Erwärmung als bei 2 Grad. In starkem Kontrast dazu riskieren die derzeitigen zusammengefassten Klimaschutzbeiträge der Staaten unter dem Übereinkommen von Paris eine globale Erwärmung um rund 3 Grad³ – in diesem Bereich wird das drastische und irreversible Kippen der Ökosysteme wahrscheinlich.⁴

Aktuell beträgt die globale Erwärmung bereits 1,1 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit.⁵ Sie ist eine direkte Folge des Ausstosses von Treibhausgasen durch menschliche Aktivitäten, insbesondere des Ausstosses von CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Um die Klimaerwärmung zu stabilisieren, müssen diese Emissionen begrenzt werden – das heisst, sie müssen innerhalb eines «CO₂-Budget» bleiben.

Der IPCC schätzt das verbleibende globale CO₂-Budget, um die Erwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen, auf total rund 500 Mia. Tonnen CO₂. Zum Vergleich: In den letzten Jahren betrug der jährliche

¹ SR 0.814.012.

² IPCC, 2018: *Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Verfügbar unter www.ipcc.ch/sr15.

³ UNEP und UNFCCC, September 2019: *The Heat is On – Taking Stock of Global Climate Ambition*. Verfügbar unter <https://unfccc.int>.

⁴ Vgl. bspw. T. M. Lenton et. al., 2019: *Climate tipping points – too risky to bet against*. *Nature* 575, 592–595. doi:10.1038/d41586-019-03595-0.

⁵ S. Medienmitteilung der UNO-Weltorganisation für Meteorologie vom 15. Januar 2019: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2019-second-hottest-year-record>.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Ausstoss rund 40 Mia. Tonnen CO₂ – beim bisherigen Verbrauch wäre das Budget also in einem guten Jahrzehnt aufgebraucht. Die weltweiten CO₂-Emissionen müssen deshalb rasch und massiv sinken – gemäss den im Sonderbericht dargestellten Emissionspfaden um rund 45 Prozent bis 2030 gegenüber 2010 und auf Netto-Null gegen 2050. Danach müssen die Emissionen in den meisten Fällen Netto-Negativ werden (Abbildung 1). Nur dann kann die globale Erwärmung mit einer genügend hohen Wahrscheinlichkeit auf 1,5 Grad begrenzt werden. Auch die menschengemachten Emissionen von weiteren Treibhausgasen, wie Methan (CH₄) oder Lachgas (N₂O) aus der Landwirtschaft, müssen rasch sinken.

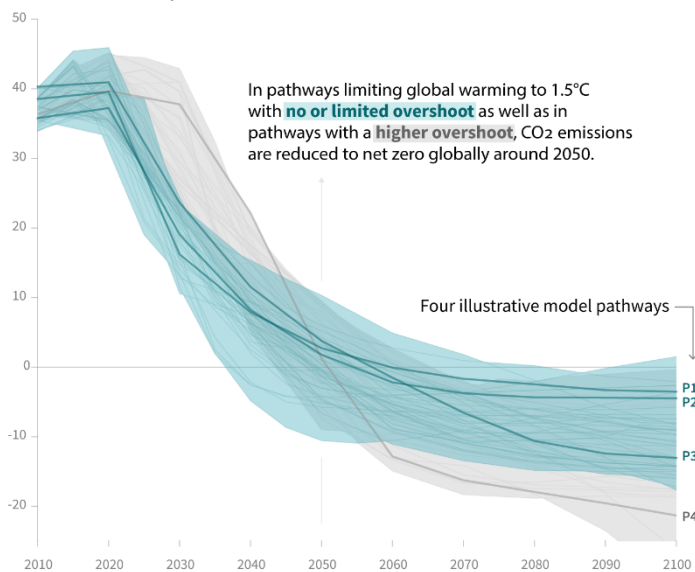
Netto-Null bedeutet, dass sich der Ausstoss von CO₂ in die Atmosphäre und die Aufnahme von CO₂ in natürlichen oder technischen Speichern die Waage halten. Dazu sind gemäss dem IPCC sogenannte *negative Emissionen* nötig; diese entziehen der Atmosphäre aufgrund von menschlichen Aktivitäten dauerhaft CO₂ (dies wird auch als *Carbon Dioxide Removal CDR* bezeichnet). Netto-Negativ bedeutet, dass die dauerhafte Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre in Speichern grösser ist als der Ausstoss.

Global emissions pathway characteristics

General characteristics of the evolution of anthropogenic net emissions of CO₂, and total emissions of methane, black carbon, and nitrous oxide in model pathways that limit global warming to 1.5°C with no or limited overshoot. Net emissions are defined as anthropogenic emissions reduced by anthropogenic removals. Reductions in net emissions can be achieved through different portfolios of mitigation measures illustrated in Figure SPM.3b.

Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr



Timing of net zero CO₂

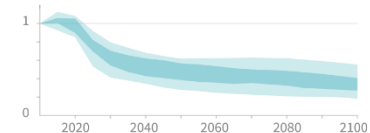
Line widths depict the 5-95th percentile and the 25-75th percentile of scenarios



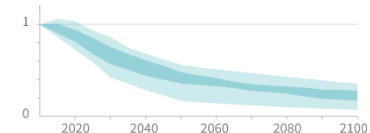
Non-CO₂ emissions relative to 2010

Emissions of non-CO₂ forcers are also reduced or limited in pathways limiting global warming to 1.5°C with **no or limited overshoot**, but they do not reach zero globally.

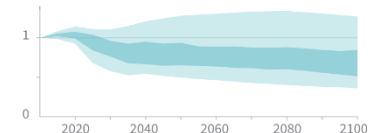
Methane emissions



Black carbon emissions



Nitrous oxide emissions



Source: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C

Abbildung 1: Das verbleibende globale CO₂-Budget, um die Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, ist beschränkt. Globale CO₂-Emissionspfade müssen entsprechend gegen 2050 auf Netto-Null – und danach in den meisten Fällen Netto-Negativ werden. Dies geht nur mit massiven CO₂-Reduktionen und grossen Entnahmen von CO₂ aus der Atmosphäre mit negativen Emissionen. Auch andere Treibhausgasemissionen wie Methan und Lachgas müssen rasch sinken. Quelle: IPCC, 2018.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Je länger mit einer massiven Reduktion der CO₂-Emissionen zugewartet wird, umso eher wird das CO₂-Budget überzogen. Entsprechend sind umso mehr negative Emissionen notwendig, und umso wahrscheinlicher wird die Erwärmungsgrenze von 1,5 Grad überschritten – mit allen negativen Folgen einer weiteren Erwärmung. Negative Emissionen sind in allen vom IPCC untersuchten Emissionspfaden, die die Erwärmung auf 1,5 Grad beschränken, eine zwingende Voraussetzung: Im Verlauf dieses Jahrhunderts wären negative Emissionen im Umfang von total 100–1000 Mia. Tonnen CO₂ notwendig (was dem 2,5- bis 25-fachen der aktuellen jährlichen CO₂-Emissionen entspricht). Bei einer Nutzung von negativen Emissionen in dieser Grössenordnung sind – technische Machbarkeit vorbehalten – Zielkonflikte insbesondere im Bereich der Landnutzung vorprogrammiert (s. Ziffer 2).

Nach aktuellem Stand des Wissens können die voraussichtlich nötigen negativen Emissionen wegen beschränkter Potenziale, Nutzungskonflikten und unerwünschter Nebenwirkungen nicht nachhaltig mit einem einzelnen Verfahren erbracht werden. Es wird daher im globalen Massstab eine breite Palette an verschiedenen Verfahren nötig sein (s. Ziffer 2). Zwischen dem gemäss den Emissionspfaden weltweit dringlich zunehmenden Bedarf an negativen Emissionen und den aktuellen Fortschritten in der Forschung, Entwicklung und Marktdurchdringung klafft jedoch eine Lücke. Das Risiko ist gross, dass sich diese Lücke ohne förderliche Rahmenbedingungen nicht oder nicht rechtzeitig schliessen lässt. Mit den richtig gesetzten regulatorischen Anreizen könnten sich hingegen für innovative Akteure aus der Forschung und Wirtschaft breitgefächerte Entwicklungs- und Geschäftsfelder eröffnen, die eine zunehmende globale Nachfrage nach negativen Emissionen bedienen könnten (s. Ziffer 3). Auch Staaten, die in diesem Bereich voranschreiten, könnten andere Staaten und internationale Institutionen beim Aufbau der nötigen Kapazitäten für negative Emissionen unterstützen.

1.3 Die Schweiz soll bis 2050 ihre Treibhausgasemissionen auf Netto-Null absenken

Die Schweiz hat sich mit der Ratifikation des Übereinkommens von Paris im Oktober 2017 zum verbindlichen Ziel verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 zu halbieren. Diese Zielsetzung bis 2030 ist Gegenstand der aktuell laufenden Totalrevision des CO₂-Gesetzes⁶. Aufgrund des Sonderberichts des IPCC zur Erwärmung um 1,5 Grad Celsius hat der Bundesrat am 28. August 2019 beschlossen, das langfristige Ziel der Schweiz zu verschärfen: Bis 2050 soll die Schweiz ihre Treibhausgasemissionen auf Netto-Null reduzieren.⁷ Dannzumal noch verbleibende Emissionen, etwa aus der Landwirtschaft, der Abfallverbrennung oder der Zementproduktion, müssen durch den Einsatz natürlicher und technischer Senken ausgeglichen werden. Damit leistet die Schweiz ihren Beitrag zur Begrenzung der weltweiten Klimaerwärmung auf unter 1,5 Grad. Das Netto-Null Ziel bis 2050 des Bundesrates ist zurzeit indikativer Natur und nicht rechtsverbindlich.

Die am 27. November 2019 eingereichte Gletscher-Initiative will dieses Netto-Null Ziel in die Verfassung aufnehmen. Damit ist der Bundesrat einverstanden, nicht jedoch mit dem grundsätzlichen Verbot fossiler Energien und der Auflage, dass Ausnahmen von diesem Verbot zwingend durch inländische Senken zu neutralisieren sind. Aus diesem Grund hat er am 3. April 2020 beschlossen, der Initiative einen direkten Gegenentwurf gegenüberzustellen und dazu am 2. September 2020 die Vernehmlassung eröffnet.

Das Netto-Null Ziel bis 2050 legt den Grundstein für die Klimastrategie 2050, welche die Schweiz bis Ende 2020 beim UNO-Klimasekretariat einreichen soll.⁸ Die langfristige Klimastrategie wird aufzeigen, wie die Schweiz die Zielsetzung für das Jahr 2050 erreichen kann, welche Massnahmen dafür erforderlich sind und wie sich die Emissionen in den verschiedenen Sektoren bis dahin entwickeln sollten.

⁶ SR 641.71, Geschäft des Bundesrates 17.071

⁷ S. Medienmitteilung des Bundesrates vom 28.8.2019: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/mitteilungen_msg-id-76206.html.

⁸ Gemäss Artikel 4.19 des Übereinkommens von Paris sind alle Vertragsparteien aufgefordert, bis Ende 2020 langfristige Klimastrategien beim UNO-Klimasekretariat einzureichen.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Sie wird sich zudem auch der Rolle von negativen Emissionen für die Zielerreichung widmen. Ohne den Ergebnissen der Langfriststrategie vorzugreifen, können zurzeit folgende Aussagen zur Emissionsentwicklung in der Schweiz und zum möglichen Bedarf nach negativen Emissionen im Jahr 2050 gemacht werden:⁹

- Prioritär ist die möglichst vollständige Reduktion von Treibhausgasemissionen aus fossilen Energien. Dies betrifft insbesondere die Sektoren Gebäude, Mobilität und Industrie, für die bereits heute klimafreundliche Alternativen verfügbar sind. Diese Sektoren müssen bis 2050 möglichst vollständig ohne Treibhausgasemissionen auskommen. Auch die übrigen, nicht energiebedingten Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft, im Abfallsektor sowie aus der Zementproduktion und bspw. aus Lösungsmitteln (synthetische Treibhausgase) müssen soweit wie möglich vermindert werden.
- Wie hoch die 2050 verbleibenden Treibhausgasemissionen sein werden, hängt von der technologischen Entwicklung, von den künftigen gesellschaftlichen Präferenzen im Bereich der Ernährung sowie vom Konsumverhalten ab. Grob abgeschätzt dürften sich für die Schweiz die schwer vermeidbaren Emissionen 2050 im Bereich von etwa 10 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (CO₂eq) pro Jahr bewegen, aufgeteilt nach:

Zementproduktion	ca. 2 Mio. Tonnen CO ₂ eq / Jahr
Kehrichtverbrennung und übriger Abfall	3–3,5 Mio. Tonnen CO ₂ eq / Jahr
Landwirtschaft ¹⁰	ca. 4,1 Mio. Tonnen CO ₂ eq / Jahr

- Diese rund 10 Mio. Tonnen CO₂eq pro Jahr müssten ab 2050 neutralisiert werden. Bei der Zementproduktion und der Kehrichtverbrennung bietet sich die CO₂-Abscheidung direkt an der Anlage und Einlagerung an (*Carbon Capture and Storage CCS*, s. Kasten 1). Emissionen aus der Landwirtschaft müssten mit negativen Emissionen ausgeglichen werden (s. Ziffer 2).
- Die Schweizer Emissionen der internationalen Luftfahrt lagen im Jahr 2018 gemäss Treibhausgasinventar gemessen an den in der Schweiz abgesetzten Flugtreibstoffen bei rund 5,7 Millionen Tonnen CO₂eq.¹¹ Sofern diese Emissionen nicht durch klimaneutrale Treibstoffe oder alternative Antriebe reduziert werden können und sofern sie in das Netto-Null Ziel einbezogen werden, wären auch diese Emissionen ab 2050 durch negative Emissionen auszugleichen.
- Der Bundesrat behält sich die Möglichkeit offen, das Netto-Null Ziel bis 2050 auch mit Massnahmen im Ausland zu erreichen. Solche Anrechnungen lässt das Übereinkommen von Paris im Rahmen von internationalen Kooperationen grundsätzlich zu (Art. 6 des Übereinkommens). Eine Beteiligung an ausländischen Senkenprojekten könnte beispielsweise wegen des in der Schweiz beschränkten Potenzials und der unklaren gesellschaftlichen Akzeptanz sinnvoll sein.
- Der Bundesrat hat sich zur Entwicklung nach 2050 noch nicht geäussert. Wie aber aus dem IPCC Sonderbericht zur Erwärmungsgrenze von 1,5 Grad Celsius klar hervorgeht, muss die Emissionsbilanz in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts *negativ* sein, damit die globale Erwärmung dauerhaft auf 1,5 Grad Celsius beschränkt werden kann (s. Ziffer 1.2).

⁹ BAFU, März 2020: *Hintergrundpapier, Klimaziel 2050: Netto-Null Treibhausgasemissionen*. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Klima > Fachinformationen > Klimaziel 2050.

¹⁰ Dieser Wert ergibt sich, wenn die landwirtschaftlichen Emissionen bis 2050 verglichen mit 1990 um die Hälfte vermindert werden. Dies entspricht einer mittleren Reduktion gemäss der Zielsetzung der Klimastrategie Landwirtschaft (s. www.blw.admin.ch > Nachhaltige Produktion > Umwelt > Klima).

¹¹ Diese Zahl deckt die Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O ab. Daten des Treibhausgasinventars verfügbar unter www.bafu.admin.ch/treibhausgasinventar. Die gesamte Klimawirkung der Luftfahrt, d.h. die genannten Treibhausgase sowie Effekte durch NO_x, Wasserdampf, Sulfat- und Rußpartikel, wird auf das Ein- bis Dreifache der CO₂-Emissionen der Luftfahrt geschätzt (vgl. bspw. Urs Neu, 2020: *Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima*. Swiss Academies Communications 15 (9), verfügbar unter www.proclim.ch/id/cSx4y).

2 Potenzial von Negativemissionstechnologien für die Schweiz

2.1 Einordnung der Begriffe

Grundlegend für die weiteren Diskussionen um negative Emissionen ist, die verschiedenen Reaktionsmöglichkeiten der Menschen auf das Klimaproblem klar zu unterscheiden. In Anlehnung an die Definitionen nach Jan C. Minx *et. al.*¹² lassen sich folgende Optionen entlang der Wirkungskette des Klimaproblems unterscheiden (Abbildung 2):

1. *Vermeidung von Treibhausgasemissionen*: Massnahmen, die an der Quelle ansetzen, um Treibhausgasemissionen zu vermeiden oder zu vermindern – bevor sie in die Atmosphäre gelangen. Dies sind Massnahmen, die den Treibhausgasausstoss aus fossilen Energieträgern und nicht-fossilen Quellen wie der Landwirtschaft reduzieren (z. B. durch Nachfragerückgang, Effizienzsteigerungen, Umstellung auf erneuerbare Energien, Änderung der Ernährungsgewohnheiten). Es können auch Massnahmen sein, die an Punktquellen wie Zementfabriken oder Kehrlichtverbrennungsanlagen CO₂ abscheiden und speichern (CCS). Unter Umständen kann auch die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ als Ressource, beispielsweise in Baustoffen, eine Vermeidungsmassnahme sein (*Carbon Capture and Utilisation CCU*, s. Kasten 1).
2. *Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre mit Negativemissionstechnologien (NET)*: Massnahmen, um mit biologischen und technischen Verfahren CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen und dauerhaft zu speichern.¹³ NET adressieren, wie auch Vermeidungsmassnahmen, das ursächliche Klimaproblem, nämlich die gegenüber der vorindustriellen Zeit stark erhöhte Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre. Während die Vermeidung die Mehrbelastung der Atmosphäre mit CO₂ verhindert, entlasten NET die Atmosphäre von CO₂.
3. *Solare Strahlungsmodifikation (SRM)*: Massnahmen, um die Sonneneinstrahlung so zu beeinflussen, dass mehr reflektiert wird (z. B. mit in die Atmosphäre eingebrachten Luftpartikeln). Dies soll der Erwärmung der Erdoberfläche entgegenwirken. Anders als die Vermeidung und NET adressiert SRM nicht die Ursache des Klimaproblems, sondern die Wirkung oder das Symptom; die zu hohe CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bleibt also unverändert (s. Kasten 2).
4. *Anpassung*: Massnahmen, damit Mensch und Natur besser mit den nicht mehr vermeidbaren Wirkungen des Klimaproblems umgehen können (z. B. Hitze- und Wassermanagement wegen zunehmender Hitzewellen und Trockenperioden).

NET und SRM werden nach wie vor oft unter einem Sammelbegriff wie «Geoengineering» zusammengefasst, was zu Unklarheiten und Missverständnissen führen kann. Zwar setzen NET wie auch SRM in der Wirkungskette des Klimaproblems nicht an den Emissionsquellen an, sondern danach, wenn die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre erhöht ist, und beide könnten theoretisch im grossflächigen Massstab in das Klimasystem der Erde eingreifen. Da es sich aber um fundamental unterschiedliche Konzepte handelt – NET gehen direkt die erhöhte CO₂-Konzentration an, SRM geht jedoch die dadurch veränderte Strahlungsbilanz der Erde an, die den globalen Temperaturanstieg verursacht – ist ein solcher Sammelbegriff nicht hilfreich. Dies wird auch von vielen Klimawissenschaftlern anerkannt; entsprechend wird der Begriff «Geoengineering» im IPCC Sonderbericht zur Erwärmung um 1,5 Grad nicht verwendet, sondern die Konzepte NET (gleichbedeutend mit CDR) und SRM werden getrennt beurteilt.

¹² Jan C. Minx *et. al.*, 2018: *Negative Emissions – Part 1: Reserach landscape and synthesis*. Environmental Research Letters 13, 063001. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>.

¹³ Zwar werden international auch Verfahren diskutiert und erforscht, die andere Treibhausgase wie Methan aus der Atmosphäre entfernen. Da CO₂ aber das bedeutendste und langlebigste Treibhausgas ist, fokussieren sich der IPCC-Sonderbericht zur Erwärmung um 1,5 Grad wie auch dieser Bericht auf die Entfernung von CO₂, was sich auch im oft synonym zu NET genutzten Begriff *Carbon Dioxide Removal (CDR)* spiegelt.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

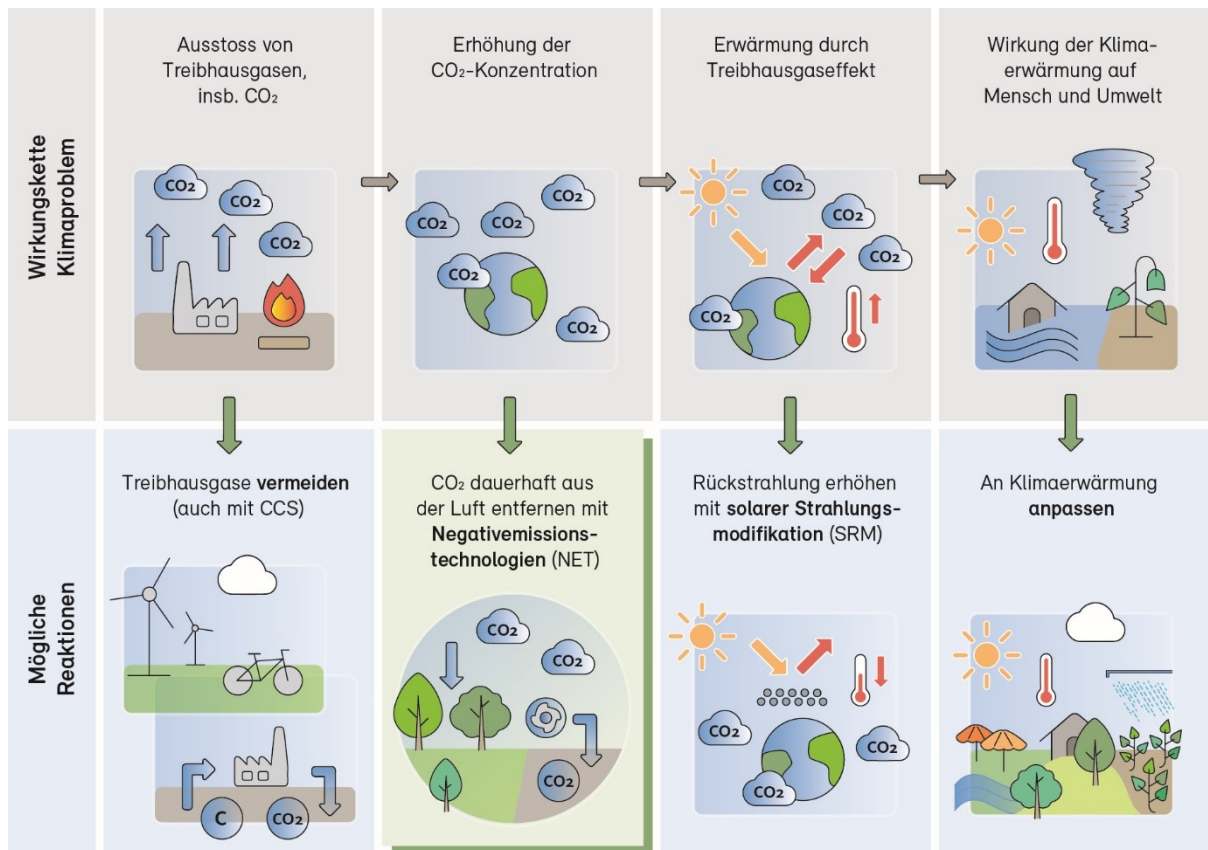


Abbildung 2: Der Mensch kann entlang der Wirkungskette des Klimaproblems unterschiedlich reagieren. Er kann vermeiden, dass Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre gelangen, indem er Emissionen gar nicht erst erzeugt oder gleich mit CCS abschiedet und speichert. Er kann aktiv mit biologischen und technischen Verfahren CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre entfernen, um die überhöhte CO₂-Konzentration zu reduzieren (NET). Er kann dem Effekt der ausgestossenen Treibhausgase – der Temperaturerhöhung – entgegenwirken, indem er die Sonneneinstrahlung stärker reflektiert (SRM). Schliesslich kann er mit Anpassungsmassnahmen auf die nicht vermeidbaren Auswirkungen der Klimaerwärmung reagieren. Quelle: BAFU-Darstellung gestützt auf Jan C. Minx et al., 2018.

Es existiert eine breite Palette an heute bekannten NET, die mit unterschiedlichen Ansätzen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und *mehr oder weniger dauerhaft* speichern können. Das CO₂ kann grundsätzlich mit Biomasse (Photosynthese) oder chemisch (via Luftfilter oder durch Bindung in Mineralien) eingefangen werden. Anschliessend wird das CO₂, oder je nach Verfahren nur der Kohlenstoff (C), in Biomasse über Grund (z. B. Holz), im Erdboden, im geologischen Untergrund, in Mineralien oder im Meeresboden gespeichert (Abbildung 3). Die für die Schweiz relevanten Ansätze werden in Ziffer 2.2 vertiefter diskutiert. Damit die Verfahren auf längere Sicht klimawirksam negative Emissionen erzeugen, muss das CO₂ dauerhaft gespeichert werden. CO₂, das in der Waldbiomasse oder im Humus im Erdboden gespeichert ist, kann zum Beispiel durch aussergewöhnliche Ereignisse (wie Waldbrand) oder durch intensive Bodenbearbeitung eher wieder in die Luft gelangen als CO₂, das im tiefen Untergrund oder in Mineralien gespeichert wird. Alle diskutierten Ansätze sind entweder in der Praxis noch nicht erprobt oder nicht in einem klimawirksamen Umfang einsatzbereit (s. Ziffer 2.2).

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

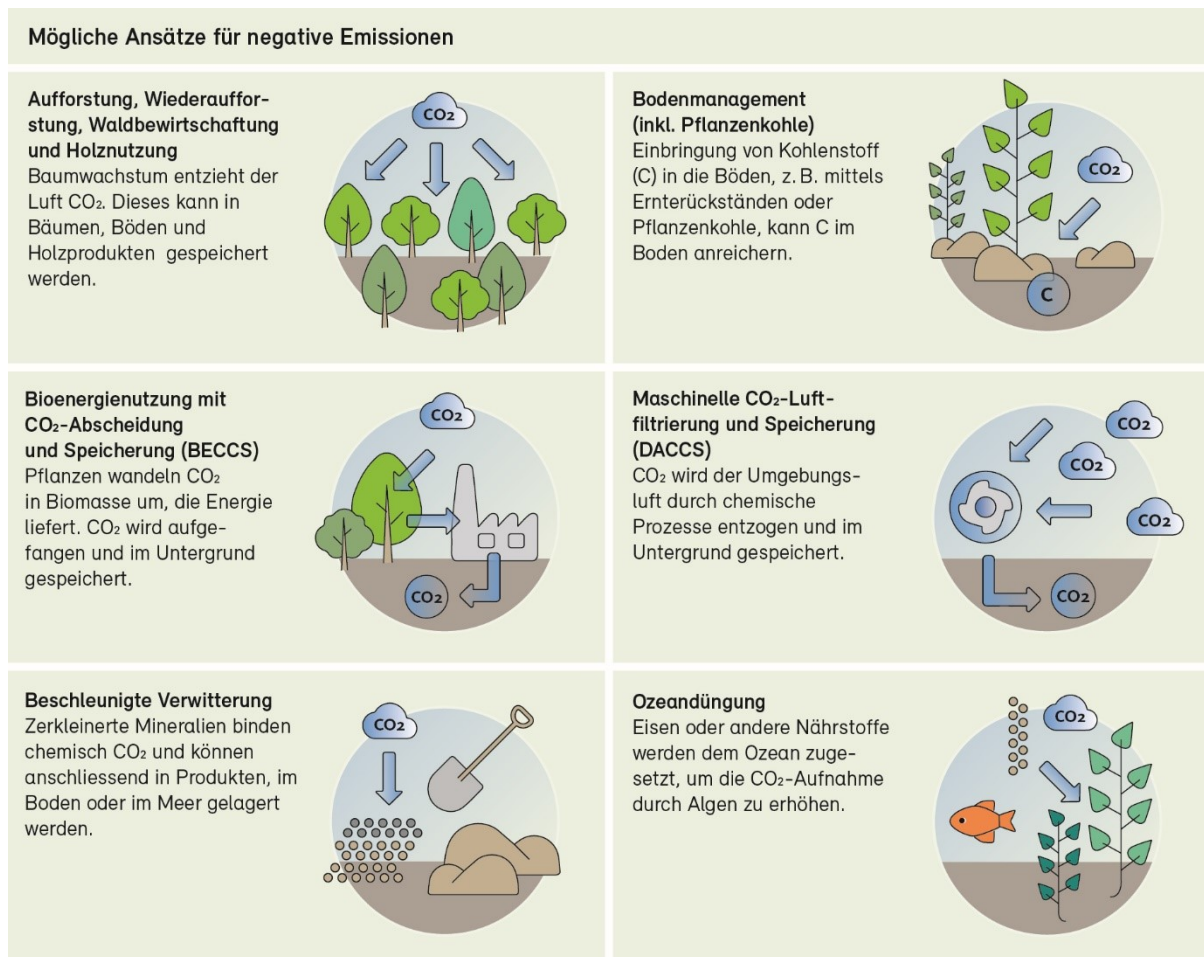


Abbildung 3: Verschiedene Ansätze können der Atmosphäre CO₂ entziehen. Mit einer aktiven Waldbewirtschaftung und Holznutzung, einer aktiven Bodenbewirtschaftung, der Einlagerung von Pflanzenkohle sowie Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage BECCS) kann CO₂ durch Biomasse eingefangen und gespeichert werden. CO₂ kann auch direkt mit Maschinen aus der Luft gefiltert und im Untergrund gespeichert werden (Direct Air Carbon Capture and Storage DACCS). Man kann auch natürliche Verwitterungsprozesse, die CO₂ in Gestein chemisch binden, beschleunigen. Damit die Verfahren negative Emissionen erzeugen, muss das CO₂ dauerhaft gespeichert werden – dies ist insbesondere bei der Wald- und Bodenbewirtschaftung schwierig zu gewährleisten. Die diskutierten Ansätze sind entweder in der Praxis noch nicht erprobt oder nicht in einem klimawirksamen Umfang einsatzbereit. Quelle: BAFU-Darstellung gestützt auf Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)¹⁴.

Kasten 1: Carbon capture, utilisation and storage (CCUS) – Werden dabei CO₂-Emissionen verzögert, vermieden, recycelt oder negativ? Es kommt auf die CO₂-Quelle an.

Zu den Technologien zur Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO₂ (CCUS) zählen:

- CO₂-Abscheidungs- und Speicherungstechnologien (*Carbon Capture and Storage CCS*), mit welchen CO₂ an der Quelle oder aus der Atmosphäre abgeschieden und anschliessend langfristig gespeichert wird;
- CO₂-Abscheidungs- und Nutzungstechnologien (*Carbon Capture and Utilisation CCU*), mit welchen CO₂ abgeschieden und anschliessend als Rohstoff verwendet wird.

Diese Technologien lassen sich nicht systematisch den Negativemissionstechnologien (NET) zuordnen. Ausschlaggebend dafür, ob es sich um eine NET handelt, ist die Emissionsquelle des abgeschiedenen CO₂.

¹⁴ S. www.mcc-berlin.net/forschung/kurz dossiers/negativeemissionen.html.

Kommen CCS-Technologien bei der Abscheidung von **CO₂ aus fossilen Quellen** (z. B. in fossilthermischen Kraftwerken oder Kehrlichtverbrennungsanlagen) oder aus geogenen Quellen (z. B. bei der Zementherstellung) zum Einsatz, so gelten sie als Technologien zur **Vermeidung von CO₂-Emissionen**. Dies ist dadurch begründet, dass das abgeschiedene und anschliessend gespeicherte CO₂ zuvor im Untergrund vorhanden war und nicht in die Atmosphäre gelangt.

CCS-Technologien lassen sich jedoch auch auf **CO₂ aus biologischen Quellen** anwenden, z. B. auf den biogenen Anteil der Emissionen von Kehrlichtverbrennungsanlagen. In diesen Fällen bringen die CCS-Technologien **negative Emissionen** hervor (mittels *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* BECCS). Tatsächlich wird in diesen Fällen CO₂ abgeschieden, welches zuvor von den Pflanzen, die als Brennstoff dienten, der Atmosphäre entzogen worden war.

Die **direkte Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre** führt ebenfalls zu **negativen Emissionen**, vorausgesetzt, das entnommene CO₂ wird dauerhaft gespeichert (*Direct Air Carbon Capture and Storage* DACCS) und beim Verfahren kommen klimafreundlich gewonnene Elektrizität und Wärme zum Einsatz.

An rund 20 Industriestandorten (Wasserstoff- oder Chemikalienproduktion) und Erdgasförderanlagen in der ganzen Welt sind CCS-Technologien im Einsatz. An diesen Standorten werden jährlich rund 40 Millionen Tonnen CO₂ abgeschieden und gespeichert. Weitere solche Anlagen befinden sich im Bau oder sind geplant.¹⁵ Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ wird in der Erdölindustrie genutzt, das heisst, es wird in aktive Bohrlöcher injiziert, wodurch die Ölausbeute erhöht wird (*Enhanced Oil Recovery*). In diesem Fall wird das abgeschiedene CO₂ zwar langfristig gelagert, aber seine Nutzung trägt zur Förderung von Rohöl und somit letztlich zur Entstehung von CO₂-Emissionen bei. Eine Netto-Speicherung von CO₂ findet nur unter besonderen Umständen und in seltenen Fällen statt.

Abgeschiedenes CO₂ kann jedoch auch – gemäss der Logik der **CO₂-Kreislaufwirtschaft** – als Rohstoff für die Herstellung von Treib- oder Brennstoffen oder anderen kohlenstoffreichen Stoffen verwendet werden (CCU). In diesem Zusammenhang sind namentlich die sogenannten **Power-to-X**-Technologien zu nennen, bei welchen CO₂, Wasser und Strom zur Produktion von Methan und anderen Chemikalien eingesetzt werden. Wird das als Rohstoff genutzte CO₂ aus der Atmosphäre entnommen oder aus Biomasse gewonnen, so kann dieses Verfahren klimaneutral sein.

Der Einsatz von CCU-Technologien muss vor dem Hintergrund der Lebenszyklusanalyse (*Life Cycle Analysis*) betrachtet werden. Damit die so hergestellten Stoffe keine verzögerten CO₂-Emissionen generieren, muss die elektrische Energie, die bei der Herstellung eingesetzt wurde, aus erneuerbaren bzw. klimafreundlichen Quellen stammen. Da diese Ressource nur in begrenztem Umfang verfügbar ist, muss der Einsatz dieser Technologien primär der Substitution schwer vermeidbarer Emissionen (z. B. in der Luftfahrt) vorbehalten bleiben.

Bei der **Nutzung von CO₂ als Ressource und seiner langfristigen Speicherung in Baustoffen** muss abhängig von der CO₂-Quelle differenziert werden. Stammt das eingesetzte CO₂ aus fossilen (oder geogenen) Quellen, kann mittels CCU-Technologien im besten Fall Klimaneutralität erreicht werden. Wurde das CO₂ hingegen der Atmosphäre entnommen, können negative Emissionen erzielt werden.

Die Abscheidung von CO₂ an der Quelle ist mit weniger Energieaufwand verbunden und zudem kostengünstiger als die Entnahme aus der Atmosphäre. Aus diesem Grund – und unter Ausklammerung weiterer Kriterien wie etwa des Speicherortes – ist die Abscheidung von CO₂-Emissionen aus fossilen Energieträgern oder aus geogenen Quellen am Ort ihrer Entstehung die kostengünstigste Alternative.

¹⁵ Global CCS Institute, 2019: *The Global Status of CCS: 2019*. Verfügbar unter www.globalccsinstitute.com/resources.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Ein zentraler Aspekt ist die **Dauerhaftigkeit der Speicherung**, und zwar unabhängig davon, welche Abscheidungstechnologie zur Anwendung kommt. Damit CCUS-Technologien effektiv eine Emissionsminderung herbeiführen, muss das CO₂ langfristig (d. h. während mindestens mehrerer Jahrzehnte) gespeichert werden. Diese Dauerhaftigkeit wird nicht zwangsläufig mit allen CCU-Technologien erreicht. Diese Feststellung gilt namentlich für die Herstellung von Treib- und Brennstoffen.

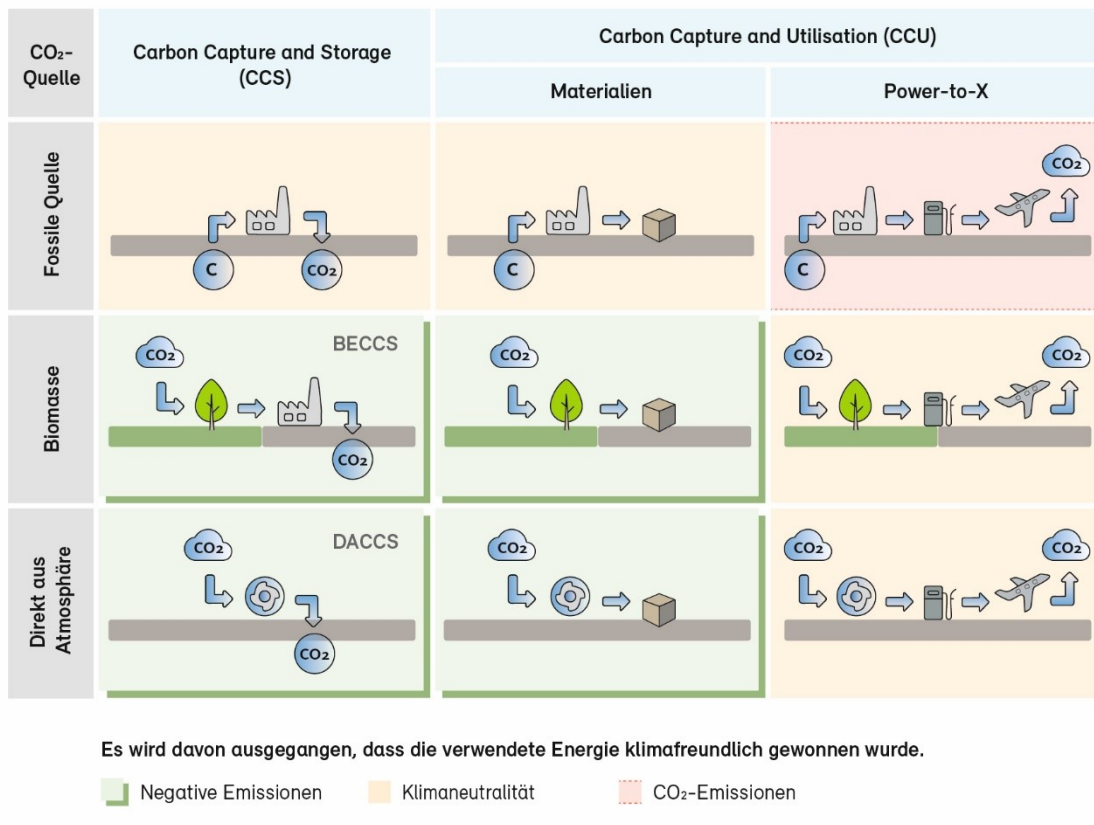


Abbildung 4: Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) kann sich je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich auf das Klima auswirken. Dies hängt von der CO₂-Quelle ab und davon, wie lange das eingefangene CO₂ gebunden wird. Angewendet auf fossiles oder geogenes CO₂ aus der Zementproduktion werden im besten Fall CO₂-Emissionen mit der Speicherung im Untergrund oder in langlebigen Materialien wie Baustoffen vermieden (netto-null) im weniger günstigen Fall von Power-to-X aber nur zeitlich verzögert ausgestossen, zum Beispiel über eine Zwischennutzung als Treibstoff. Angewendet auf CO₂ aus der Atmosphäre, das mittels Biomasse (BECC) oder maschineller CO₂-Luftfiltrierung (Direct Air Carbon Capture DACC) eingefangen wird, werden im besten Fall negative Emissionen erzeugt mittels Speicherung im Untergrund oder langlebigen Materialien – im weniger günstigen Fall von Power-to-X wird das eingefangene CO₂ via Zwischennutzung wieder ausgestossen (netto-null). Zwischennutzungen von atmosphärischem CO₂ via Treibstoffe oder kurzlebige Materialien könnten die Grundlage für eine klimaschonenden CO₂-Kreislaufwirtschaft bilden, sie liefern aber keine negativen Emissionen. Quelle: BAFU-Darstellung.

Kasten 2: Solare Strahlungsmodifikation SRM – Ein unsicherer, unerprobter Ansatz, um die Erde zu kühlen, der jedoch keine negativen Emissionen erzeugt.

Die solare Strahlungsmodifikation (SRM) will die auf der Erdoberfläche eintreffende Sonneneinstrahlung – zum Beispiel mit vom Menschen eingebrachten Luftpartikeln – verringern. Sie könnte theoretisch dazu beitragen, die globale Erwärmung temporär zu begrenzen (jeweils nur so lange, wie die Massnahme aufrechterhalten wird). Sie erzeugt aber keine negativen Emissionen, d.h. sie entnimmt kein CO₂ aus der Luft, sondern sie verändert die Strahlungsbilanz der Erde. Die wissenschaftlichen Unsicherheiten in Bezug auf ihre Anwendung und mögliche Risiken für Mensch und Umwelt sind aber gross und ungenügend erforscht. Aus diesem Grund ist aus Sicht der Akademien der Wissenschaften eine globale Anwendung von SRM bis auf Weiteres nicht zu verantworten.¹⁶ Auch hätte SRM keinen positiven Einfluss auf die zunehmende Versauerung der Ozeane, die durch die menschengemachten CO₂-Emissionen entsteht, da sie nur das Symptom, die Erwärmung, bekämpft und nicht die Quelle, die Treibhausgasemissionen. SRM wurde in keinem der modellierten IPCC-Emissionspfade berücksichtigt (s. Ziffer 1.2).

Getrieben durch die zunehmenden Klimaschäden steigt auf internationaler Ebene die Gefahr, dass kaum erprobte und riskante Technologien, namentlich aus dem Bereich SRM, unkoordiniert und unilateral von einzelnen Staaten, wirtschaftlichen Akteuren oder gar Privatpersonen eingesetzt werden – mit möglicherweise gravierenden Folgen für die Umwelt und breite Bevölkerungsschichten. Umso wichtiger ist es, in geeigneten internationalen Foren das Wissen um die Chancen, Risiken und Wissenslücken rund um SRM wie auch NET aufzubauen und Ansätze für eine wirksame internationale Gouvernanz im Bereich der Erforschung, Anwendung und Kontrolle von SRM und NET zu diskutieren. In diese Richtung ging eine von der Schweiz an der vierten Vollversammlung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) im März 2019 eingebrachte Resolution, welche forderte, dass UNEP eine Studie über Potenzial, Risiken und Gouvernanzbedürfnisse für die verschiedenen Technologien (CDR bzw. NET sowie SRM) zuhanden der Mitgliedsstaaten erstellt. Für den Antrag gab es indes keinen Konsens. Die Schweiz wird sich zusammen mit anderen Staaten weiterhin dafür einsetzen, dass UNEP eine solche Studie erstellt und damit ein Prozess zur multilateralen Gouvernanzdiskussion gestartet wird. (s. Ziffer 3). Die Schweiz hat sich zudem dafür engagiert, dass sich das IPCC auch mit dem Thema Gouvernanz von NET und SRM befasst, und hat zur Unterstützung eine Studie durch das International Risk Governance Center (IRGC) der Ecole Polytechnique fédérale in Lausanne finanziert.¹⁷

2.2 Potenzial für die Schweiz und Stand der Entwicklungen

In der Schweiz könnten nach aktueller Einschätzung insbesondere eine verbesserte Wald- und Bodenbewirtschaftung, die Einlagerung von Pflanzenkohle, BECCS, DACCS und allenfalls die beschleunigte Verwitterung (von Zement) CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und *mehr oder weniger dauerhaft* speichern. Negative Emissionen, die aus einer *dauerhaften* Speicherung über mehrere Jahrzehnte – besser über Jahrhunderte – resultieren, könnten einen Beitrag zur Erreichung des Netto-Null Ziels der Schweiz bis 2050 leisten (s. Ziffer 1.3).

Manche Ansätze, wie die Auf- oder Wiederaufforstung, sind wohlbekannt, andere, wie DACCS, noch in den Kinderschuhen. Ob die Ansätze bis 2050 substantielle Mengen an negativen Emissionen erbringen können, hängt neben den *theoretischen Potenzialen* («Innerhalb der Grenzen der Physik und Chemie ...») und *technischen Potenzialen* («Nach heutigem Stand der Forschung ...») auch massge-

¹⁶ Akademien der Wissenschaften der Schweiz, 2018: *Emissionen rückgängig machen oder die Sonneneinstrahlung beeinflussen: Ist «Geoengineering» sinnvoll, überhaupt machbar und, wenn ja, zu welchem Preis?* Verfügbar unter www.proclim.ch/id/hWSRV.

¹⁷ IRGC, 2020: *International governance issues on climate engineering. Information for policymakers*. Bericht im Auftrag des BAFU. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Internationales > Publikationen und Studien > Studien.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

blich von den *wirtschaftlichen Potenzialen* («Rechnet sich auf Basis der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen ...»), den *ökologischen Potenzialen* («Ohne den Ökosystemen zu schaden ...») und den *sozialen Potenzialen* («Was gesellschaftlich akzeptiert wird ...») ab. Daraus ergibt sich das *nachhaltig realisierbare Potenzial*, das sich mit der Zeit – z. B. abhängig von technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen – verändern kann (Abbildung 5).

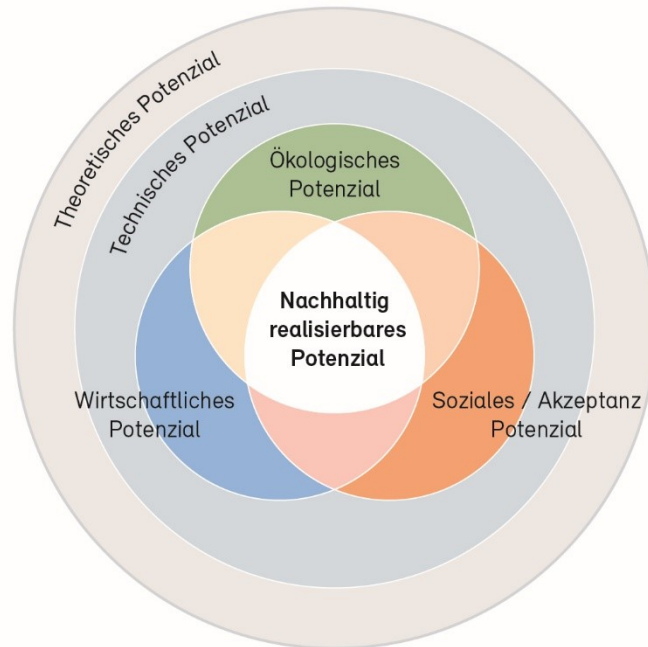


Abbildung 5: Wie viel des theoretischen Potenzials von Negativemissionstechnologien (NET) – was also innerhalb der Grenzen der Physik und Chemie möglich wäre – nachhaltig realisiert werden kann, ist abhängig von technischen Entwicklungen, ökologischen Grenzen, wirtschaftlichen Chancen und der gesellschaftlichen Akzeptanz. Das nachhaltig realisierbare Potenzial ist keine fixe Grösse, sondern kann im Laufe der Zeit durch förderliche Rahmenbedingungen zunehmen und durch hinderliche Rahmenbedingung abnehmen. Zurzeit gibt es diverse Barrieren, die der nachhaltige Realisierung eines möglichst hohen Anteils des theoretischen Potenzials von NET im Weg stehen.

Die Stiftung Risiko-Dialog hat in einem Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU den aktuellen Stand des Wissens für eine Anwendung von NET in der Schweiz zusammengefasst.¹⁸ Gestützt auf die Angaben der involvierten Stakeholder geht sie von einem langfristigen *theoretischen* Senkenpotenzial von total rund 6 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr in der Schweiz aus. Das tatsächlich *realisierbare* Potenzial dürfte jedoch deutlich tiefer liegen und lässt sich noch nicht präzise quantifizieren; es ist abhängig von der Entwicklung der Technologien, der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, ökologischen Aspekten und der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Gestützt auf Einschätzungen der Akademien der Wissenschaften der Schweiz¹⁹ geht die Stiftung Risiko-Dialog von aktuellen Kosten von null bis zu über 1000 Franken pro Tonne aus der Atmosphäre entferntes CO₂ aus, wobei biologische Ansätze in der Tendenz günstiger sind. Die Kostenbereiche können sich mit der Zeit nach oben (z. B. wegen beschränkter Biomasse) oder unten (z. B. wegen technischer Fortschritte und Skaleneffekten) entwickeln.

Die nach aktuellem Wissen geschätzten Potenziale für 2050 (Senkenleistung pro Jahr) in der Schweiz und Kosten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die biologischen Ansätze konkurrieren um Land und

¹⁸ Stiftung Risiko-Dialog, 2019: *The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy*. Bericht im Auftrag des BAFU. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Klima > Publikationen und Studien > Studien.

¹⁹ Akademien der Wissenschaften der Schweiz, 2018

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Biomasse; die genannten Potenziale, die sich zum Teil überlappen, können daher nicht *tel quel* zusammengezählt werden. Dies wurde im Sinne eines Portfolio-Ansatzes bei der Schätzung des Gesamtpotenzials berücksichtigt.

Tabelle 1: Die angegebenen theoretischen Senkenleistungen pro Jahr für verschiedene Negativemissionstechnologien entsprechen den Angaben von verschiedenen Stakeholdern (Stiftung Risiko-Dialog, 2019). Die biologischen Ansätze konkurrieren jedoch um Land und Biomasse; die genannten Potenziale, die sich zum Teil überlappen, können daher nicht *tel quel* zusammengezählt werden. Die Kohlenstoffspeicher in Wald, Holz und Boden können bereits nach wenigen bis mehreren Jahrzehnten ein Niveau erreichen, welches keine weitere zusätzliche Speicherung mehr zulässt. Unter Umständen können sie sogar wieder zu CO₂-Emissionsquellen werden. Für DACCS ist das gesamte theoretische geologische CO₂-Speicherpotenzial in der Schweiz angegeben; pro Jahr könnte aber nur ein Bruchteil des Potenzials genutzt werden, sofern geologische CO₂-Speicher in der Schweiz erschlossen werden können. Die Kostenschätzungen stammen von den Akademien der Wissenschaften der Schweiz²⁰.

Negativemissions-technologie	Theoretisches Potenzial in der Schweiz im Jahr 2050²¹ (Senkenleistung pro Jahr, ausser für DACCS total; Einzelbetrachtungen je Ansatz, z. T. mit Überlappungen)	Kosten pro Tonne aus der Atmosphäre entferntes CO₂²² (heute und mögliche zukünftige Kostenuntergrenze)
<i>Waldbewirtschaftung und Holznutzung</i>	3,1 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr (inkl. Substitutionseffekte von 1–2 Mio. Tonnen CO ₂)	1–100 Franken
<i>Bodenmanagement</i>	2,7 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr (für wenige Jahrzehnte)	0–80 Franken
<i>Einbringung von Pflanzenkohle</i>	2,2 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr (falls fast alle verfügbare Trockenbiomasse genutzt wird)	10–135 Franken
<i>Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS)</i>	5,1 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr (falls alle verfügbare Trockenbiomasse genutzt wird)	50–250 Franken
<i>Maschinelle Luftfiltrierung und Speicherung (DACCS)</i>	2'500 Mio. Tonnen CO ₂ (<u>totales</u> theoretisches geologisches Speicherpotenzial)	40–1000 Franken
<i>Beschleunigte Verwitterung (via Zement)</i>	2,5 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr	20– über 1000 Franken
Geschätztes theoretisches Gesamtpotenzial gemäss Stakeholdern²¹ (Portfolio-Ansatz, Gesamtbeurteilung ohne Überlappungen)	6 Mio. Tonnen CO ₂ / Jahr	

Die folgenden Absätze beschreiben die Potenziale und den Stand der Entwicklung der einzelnen Ansätze in der Schweiz etwas vertiefter. Da grundsätzlich auch eine Umsetzung im Ausland an das Netto-Null Ziel der Schweiz bis 2050 angerechnet werden könnte (z. B. im Rahmen von internationalen Kooperationen unter Art. 6 des Übereinkommens von Paris), werden auch die allenfalls im Ausland nutzbaren Potenziale angesprochen. Für einen umfassenden Überblick aus Sicht von Schweizer

²⁰ Akademien der Wissenschaften der Schweiz, 2018

²¹ Stiftung Risiko-Dialog, 2019

²² Akademien der Wissenschaften der Schweiz, 2018

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Stakeholdern sei auf den Bericht der Stiftung Risiko-Dialog verwiesen. Eine Übersicht zu den weltweiten Potenzialen, Kosten, Chancen und Risiken von NET liefert der IPCC Sonderbericht zur Erwärmungsgrenze von 1,5 Grad Celsius.²³

Aufforstung, Wiederaufforstung, Waldbewirtschaftung und Holznutzung

Definition: Unter Aufforstungen versteht man die Anpflanzung oder Aussaat von Bäumen auf Flächen, welche seit mindestens 50 Jahren nicht mehr bewaldet waren. Wenn es sich um eine in den letzten 50 Jahren bewaldete Fläche handelt, spricht man von einer Wiederaufforstung. Die Waldbewirtschaftung fasst alle Aktivitäten zusammen, welche dazu beitragen, dass der Wald seine vielfältigen Funktionen wahrnehmen kann. Holznutzung ist eine Waldbewirtschaftungsart, welche Bäume gezielt erntet und das so gewonnene Holz entweder für Produkte oder als Energieholz nutzt.

Potenzial: Eine verbesserte Waldbewirtschaftung kombiniert mit Holznutzung bietet eine signifikante *theoretische* Klimaschutzwirkung von rund 3 Mio. Tonnen CO₂eq pro Jahr (Vermeidung von CO₂ durch Substitutionseffekte sowie allenfalls negative Emissionen).²⁴ Dies kann erreicht werden, wenn möglichst viel des Zuwachses an Biomasse erst in langlebigen Holzprodukten und anschliessend energetisch für die Erzeugung von Strom oder Wärme genutzt wird (Kaskadennutzung). Durch die Kaskadennutzung kann das Holz nicht nur CO₂ aus der Atmosphäre als Kohlenstoff speichern, sondern als Produkt (materielle Substitution) und Energieträger (energetische Substitution) zusätzlich fossiles CO₂ oder solches aus der Zementproduktion im Umfang von rund 1–2 Mio. Tonnen CO₂eq pro Jahr vermeiden (z. B. Vermeidung von CO₂ durch Holz statt Zement als Baustoff; Wärme und Strom aus Holzenergie). Negative Emissionen werden aber nur durch die zusätzliche und langfristige CO₂-Speicherung in Holzprodukten und im Wald erzeugt (1–2 Mio. Tonnen CO₂eq pro Jahr). Wenn die Holzprodukte schliesslich energetisch genutzt werden, geht das eingefangene CO₂ jedoch wieder in die Luft (Netto-Null Effekt). Nur wenn das CO₂ bei der Verbrennung abgeschieden und geologisch gelagert werden kann, sind dauerhafte negative Emissionen möglich (vgl. BECCS unten).

Für grossflächige Aufforstungen fehlen in der Schweiz die freien Flächen. Auch die natürliche Wiederbewaldung (Vergandung) von aufgegebenen Flächen bietet wenig Potenzial, da die Vergandung im Konflikt steht mit anderen politischen Zielen (regionale Wertschöpfung, Landschaftsbild, Biodiversität etc.). Es wird jedoch erwartet, dass die Waldfläche im Zuge des Klimawandels zunimmt, da die Waldgrenze im Gebirge um bis zu 500 m ansteigen könnte. Der Schweizer Wald hat über die letzten drei Jahrzehnte in den Bäumen und im Waldboden insgesamt rund 2,5 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr gebunden. Der Holzvorrat im Wald ist wegen geringer Holzernten bereits relativ hoch, insbesondere in schwer zugänglichen Gebieten. Zusätzliches Potenzial aus einer weiteren Erhöhung des Holzvorrats im Wald durch einen (partiellen) Nutzungsverzicht («Senkenwald») ist entsprechend nur an bestimmten Standorten und in dafür geeigneten Waldbeständen vorhanden. Um langfristig negative Emissionen zu generieren, müsste der Vorrat an geeigneten Standorten erhöht und bewahrt werden, die Holzernte umfassend kaskadenartig genutzt und die energetische Nutzung mit Abscheidung und Einlagerung des CO₂ erfolgen (BECCS).²⁵

Risiken: In biologischen Systemen, wie z. B. im Wald, sind grosse Kohlenstoffmengen gespeichert. Die Speicherung ist reversibel: Der Kohlenstoff kann durch verschiedene Prozesse wieder freigesetzt werden, z. B. durch Störungen (Waldbrand, Sturm, Schädlinge, Trockenheit, etc.) oder infolge Überalterung der Bestände. Je nachdem, welche Prozesse zum Abbau der Biomasse führen, wird der Kohlenstoff sehr schnell (Waldbrand) oder über mehrere Jahre bis Jahrzehnte (Abbau von Totholz) freigesetzt. Mit zunehmendem Klimawandel steigt das Risiko, dass Störungen zunehmen und der Wald partiell von einer Senke zu einer Quelle wird, da die Abbauprozesse gegenüber dem Zuwachs überwiegen. Dieses Risiko ist insbesondere in Regionen gross, in denen die Baumbestände bereits heute stark von Hitze und Trockenheit betroffen sind. Darum ist es wichtig, Massnahmen zur Anpassung des

²³ S. IPCC, 2018, Kapitel 4 (*Strengthening and Implementing the Global Response*), Ziffer 4.3.7 (*Carbon Dioxide Removal (CDR)*).

²⁴ Stiftung Risiko-Dialog, 2019

²⁵ BAFU, 2007: CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Klima > Publikationen und Studien.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Waldes an den Klimawandel umzusetzen. Ein Wald braucht auch Platz, eine forcierte Aufforstung stünde entsprechend im Konflikt mit anderen Nutzungen (z. B. Landwirtschaft).

Chancen, Akteure und Barrieren: Positiv hervorzuheben sind die eher tiefen Kosten und die technische «Reife»; die beschriebenen Ansätze sind erprobt und bekannt. Herausforderungen bestehen bei der Bestimmung der Senkenleistung, die im Rahmen von vertieften Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen zu den Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg) erfolgen muss. Die Beurteilung der Senkenleistung erfolgt integral für die ganze Schweiz. Eine fragmentierte Betrachtung über Teilflächen (Wald) oder Teilmengen (Holz) verursacht Schwierigkeiten bei der Abgrenzung und birgt das Risiko von Doppelzählungen. Aktuell besteht zwar eine beträchtliche Holznachfrage in der Schweiz, die erzielten Preise sind aber so tief, dass für gewisse Regionen die Kosten für die Holzernte nicht gedeckt werden können und Importe die Nachfrage abdecken. Erschwerend für eine koordinierte Wald- und Holznutzung in der Schweiz sind sicher auch die unterschiedlichen Zeitskalen: Die Holznachfrage kann sehr rasch ändern und auf kurzfristige Trends reagieren, während die Holzproduktion unter Umständen vom Wachstum der nachgefragten Baumarten abhängig ist. Um das Potenzial der Waldbewirtschaftung und Holznutzung für die Kohlenstoffspeicherung optimal zu nutzen, müsste unter anderem eine stärkere Nachfrage nach Schweizer Holz generiert werden. Eine abgestimmte Kooperation zwischen Wald- und Holzbranche ist dafür nötig.

Ausland: Mit dem Erhalt der weltweiten Waldflächen können beträchtliche Emissionen effektiv und kostengünstig vermieden werden. REDD+ (*Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation*) aus den internationalen Klimaverhandlungen bietet einen Rahmen, um Emissionen aus Wäldern zu vermeiden und gleichzeitig meist positive Effekte auf den Erhalt der Biodiversität und auf die Lebensgrundlagen der Lokalbevölkerung zu erzielen. Die UNO hat sich unter dem Strategischen Plan für Wälder 2017–2030 das Ziel gesetzt, die globale Waldfläche bis 2030 um 3 Prozent zu erhöhen, was zusätzlich der Atmosphäre CO₂ entziehen könnte. Die Schweiz kann wie bisher im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit und der internationalen Klimafinanzierung mit Projekten zur Wiederaufforstung von ehemaligen Waldflächen und der Wiederherstellung degradierter Waldflächen wesentlich zum Klimaschutz beitragen. Die Aufforstung von freien Flächen braucht jedoch viel Land, stabile Nutzungsrechte und Wasser, was in einigen Ländern mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren kann. Waldsenken im Ausland könnten einen Beitrag zum Schweizer Netto-Null Ziel leisten, wenn Massnahmen zur Dauerhaftigkeit der CO₂ Speicherung in den Wäldern ergriffen werden – denn erst dann entstehen negative Emissionen – und eine Anrechenbarkeit gestützt auf etablierte Mess- und Kontrollmechanismen eingeführt wird.

Bodenmanagement

Definition: Die Veränderung des Kohlenstoffgehalts des Bodens ist das Resultat aus Kohlenstoffeintrag (z. B. über Gülle und Ernterückstände) und Kohlenstoffabgabe (z. B. durch Zersetzung). Will man den Kohlenstoffgehalt des Bodens erhöhen, muss man entweder zusätzlichen Kohlenstoff zuführen oder Prozesse verhindern, welche Kohlenstoff abführen.

Eine Anreicherung kann sowohl im Oberboden (z. B. organische Düngung, Verbleib von Ernterückständen, Zwischenfruchtanbau, verbesserte Fruchtfolgen, Anbau mehrjähriger Futterpflanzen, minimale Bodenbearbeitung, Umwandlung Acker- zu Grünland) wie auch im Unterboden (z. B. Anbau tiefwurzelnder Pflanzen, mechanisches Einbringen wie Tiefpflügen) erfolgen. Eine weitere Möglichkeit, welche zusätzlich noch oberirdische Biomasse aufbaut, besteht in der Anlage von Agroforstsystemen (Kombination von Ackerbau und/oder Tierhaltung mit der Nutzung von Gehölzen auf gleicher Fläche), Hecken und Feldgehölzen. Ein Spezialfall, der unten separat diskutiert wird, ist das Ausbringen von Pflanzenkohle. Viele der obengenannten Massnahmen werden in der Schweiz bereits zum Erhalt oder zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit angewandt.

Potenzial: Gestützt auf optimistische Schätzungen könnten über einen Zeitraum von wenigen Jahrzehnten hinweg theoretisch rund 2,7 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr durch landesweit flächendeckende

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

verbesserte Bodenbewirtschaftung und angepasste landwirtschaftliche Praktiken im Boden gespeichert werden.²⁶ Erste Abschätzungen der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope deuten jedoch darauf hin, dass die realisierbaren Potenziale wesentlich geringer sind. Die Umsetzung und der Effekt von Massnahmen sind stark abhängig vom jeweiligen Standort und der langfristigen Bewirtschaftungsweise. Entsprechend ist auch eine pauschale Wirkungsabschätzung wenig aussagekräftig. Zudem bestehen grosse Unsicherheiten bei der Quantifizierung, da u. a. flächendeckende detaillierte Bodeninformationen fehlen.

In der Schweiz emittieren die genutzten organischen Böden (ehemalige Moore) jährlich rund 0,6 Mio. Tonnen CO₂eq. Eine Wiedervernässung und/oder die Etablierung alternativer Nutzungsformen (z. B. Paludikulturen²⁷, Nassreisbau), die ökonomisch tragbar sind und den weiteren Abbau der organischen Substanz verhindern, stellen effektive Klimaschutzmassnahmen dar. Auch die viel häufiger vorkommenden drainierten Mineralböden setzen vermutlich viel CO₂ frei. Dieser Prozess ist jedoch bislang nicht näher erforscht worden. Alle Massnahmen, welche Kohlenstoffverluste aus drainierten Böden reduzieren, führen zwar nicht zu negativen Emissionen, tragen aber dazu bei, dass weniger Emissionen mit negativen Emissionen ausgeglichen werden müssen.

Risiken: Die Senkenleistung ist endlich, da mit einer Anreicherung von Kohlenstoff im Boden ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen Auf- und Abbau der organischen Substanz erreicht wird. Das jährliche Senkenpotenzial wird nur über einen Zeitraum von wenigen Jahrzehnten aufrechterhalten werden können. Wie die Waldsenken sind auch die Bodensenken reversibel. Anders als beim Wald (kaskadenartige Holznutzung), kann der Boden als Kohlenstoffspeicher nicht klimaschonend «geleert» werden, damit die Senkenleistung des Bodens langfristig in nennenswertem Umfang verfügbar ist. Bei einer Änderung der Bewirtschaftungsweise oder auch langfristig infolge des Klimawandels kann der gespeicherte Kohlenstoff rasch wieder freigesetzt werden. Massnahmen, welche zusätzliche Biomasse in den Boden einbringen, können andere Biomassennutzungen (z. B. Biogasanlagen) konkurrenzieren oder zu Nährstoffüberschüssen oder Schadstoffeinträgen im Boden führen.

Chancen, Akteure und Barrieren: Der organische Kohlenstoffgehalt des Bodens («Humusgehalt») gilt als Indikator für Bodenfruchtbarkeit und eine nachhaltige Bewirtschaftung. Massnahmen, welche den Humusaufbau fördern, können neben der Senkenleistung weitere Vorteile haben: Sie erhöhen landwirtschaftliche Erträge, verbessern die Wasserdurchlässigkeit, fördern die Bodenbiodiversität oder reduzieren die Erosion. Viele Praktiken sind anwendungsreif, zum Teil sind sie in der Schweiz bereits etabliert und gehören zur landwirtschaftlichen Praxis. Auch sind die Kosten im Vergleich zu anderen NET für viele Massnahmen eher tief. Eine grosse Herausforderung ist allerdings der Nachweis der Kohlenstoffanreicherung, insbesondere da eine Vielzahl von Faktoren auf die Kohlenstoffbilanz im Boden wirkt und zeitlich und räumlich grosse Unterschiede bestehen. Die Bedeutung der Kohlenstoffspeicherung im Boden nimmt in der Klimaschutzdiskussion zu, da er – wie der Wald auch – sowohl zur Vermeidung von Emissionen, zu allfälligen negativen Emissionen und zur Anpassung an den Klimawandel beitragen kann. Deshalb werden im Rahmen von Ressourcenprojekten des Bundesamts für Landwirtschaft BLW mögliche Umsetzungsmassnahmen mit Bezug zu Bodenkohlenstoff angegangen,²⁸ und verschiedene weitere Akteure²⁹ haben Bodenprojekte vorangetrieben. Die zentralen Fragen zur Eignung der Bodenkohlenstoffanreicherung als Klimaschutzmassnahme, insbesondere das gegenwärtig nur mit hoher Unsicherheit abschätzbare Potenzial, werden bis Herbst 2021 im Rahmen des Postulats 19.3639 («Kohlenstoffsequestrierung in Böden») bearbeitet.

Ausland: Die weltweiten Standortverhältnisse, wie auch klimatische und sozioökonomische Faktoren sind zu divers für eine generelle Aussage über das Potenzial von Bodenprojekten in anderen Ländern. Vor allem in nährstoffarmen und oft degenerierte Böden der (Sub-)Tropen könnten theoretisch grosse

²⁶ Stiftung Risiko-Dialog, 2019

²⁷ Nasse Bewirtschaftung organischer Böden, die organische Substanz erhalten.

²⁸ Ressourcenprogramm Humus, ALW und AfU Kanton Solothurn, Solothurnischer Bauernverband SOB; AgroCO₂concept Flaachthal, Verein AgroCO₂concept.

²⁹ Haute Ecole du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA) de Genève, myclimate, Terres Vivantes, Ebenrain-Zentrum für Landwirtschaft, Natur und Ernährung, bodenproben.ch ag zusammen mit CarboCert GmbH.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Mengen an Kohlenstoff eingebracht werden. Weil im Boden gespeicherter Kohlenstoff unter Umständen wieder als CO₂ in die Luft gelangen kann, sollte für Bodenprojekte im Ausland nicht ausschliesslich das Klima, sondern mindestens ebenso die Ernährungssicherheit und damit die Bodenfruchtbarkeit im Fokus stehen. Bisläng fehlt allerdings ein wirksamer und weltweit etablierter Mess- und Kontrollmechanismus, daher ist eine Anrechenbarkeit an die Klimaziele der Schweiz fraglich. Investitionen in den Schutz intakter Moore oder in die Renaturierung von gestörten Mooren und degenerierten genutzten organischen Böden, die weltweit Hotspots für CO₂- und ggf. auch N₂O-Emissionen darstellen, sind immer effiziente Klimaschutzmassnahmen.

Einbringung von Pflanzenkohle

Definition: Unter Pflanzenkohle versteht man «verkohlte» Biomasse meist pflanzlicher Herkunft. Es gibt eine Vielzahl an Ausgangsstoffen, Herstellungsverfahren und möglichen Anwendungsbereichen. Bei Pflanzenkohle, die mit dem Ziel der Bodenverbesserung und Kohlenstoffspeicherung in Böden eingebracht wird, handelt es sich in der Regel um Pyrolyse-Kohle, die bei hohen Temperaturen und unter Sauerstoffausschluss gebildet wird und einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist. Pflanzenkohle kann in mehrfacher Hinsicht klimawirksam sein (siehe «Potenzial» unten). Sie verweilt im Boden aufgrund ihrer stabilen chemischen Struktur deutlich länger als andere organische Verbindungen.

Potenzial: Mit dem Einbringen von Pflanzenkohle liesse sich – wenn fast alle landesweit nachhaltige nutzbare Biomasse verwendet wird – theoretisch eine Senke in der Höhe von bis zu 2,2 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr erzeugen.³⁰ Daneben können mit Pflanzenkohle in landwirtschaftlichen Böden die N₂O-Emissionen oft messbar reduziert werden. Zukünftig könnten Pyrolyse-Anlagen mit Fernwärmenetzen und CCS (pyrogene CO₂-Abscheidung und -Speicherung; PyCCS) gekoppelt werden, womit zusätzlich weitgehend CO₂-freie Energie und weitere negative Emissionen aus dem abgeschiedenen Pyrolysegas erzeugt werden könnten.

Risiken: Entscheidend für die Klimawirksamkeit ist die Stabilität der Pflanzenkohle im Boden. Diese ist einerseits vom Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess abhängig, aber auch Bodeneigenschaften sowie Klima und landestypische Bewirtschaftung beeinflussen die Stabilität der Pflanzenkohle. Verschiedene Studien geben Hinweise darauf, dass die Kohlenstoffanreicherung in mitteleuropäischen Ackerböden eher Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte anhält und nicht über Jahrtausende erhalten bleibt, wie frühere Studien und Analogieschlüsse zu speziellen tropischen Böden («Terra Preta») nahelegen. Es besteht zudem die Gefahr, dass mit der Pflanzenkohle Schadstoffe (z. B. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB) oder Schwermetalle) in die Böden eingebracht werden. Auch sind Auswirkungen der Pflanzenkohle auf die Bodenlebewesen kaum untersucht. Weiter könnte Pflanzenkohle die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln herabsetzen. Von Seiten einiger kantonaler Bodenschutzstellen wurden erhebliche Bedenken gegen einen sofortigen grossflächigen Einsatz von Pflanzenkohle geäussert («Vorsorgeprinzip»).

Biomasse ist ein begrenzt verfügbares Gut, und die Produktion von Pflanzenkohle steht in Konkurrenz zu alternativen und etablierten Verwertungen (z. B. Kompostierung, Verwendung als Hofdünger, Energieerzeugung, auch BECCS). Ein weiterer Zielkonflikt wird durch die schwarze Farbe der Pflanzenkohle hervorgerufen: Dunklere Felder reflektieren weniger Sonnenstrahlung und erwärmen schneller. Diese Veränderung der Rückstrahlung (Albedo) auf den behandelten Flächen muss noch genauer studiert werden.

Generell beruhen die meisten Erkenntnisse auf kurzen Beobachtungszeiträumen, und es fehlen Studien über die Langzeitwirkungen von Pflanzenkohle in landwirtschaftlichen Böden. Die genaue Klimawirkung kann derzeit nicht angegeben werden, da noch zu viele Unsicherheiten bestehen. Um die teilweise widersprüchlichen Beobachtungen bewerten zu können, bedarf es langfristiger Freilandversuche, die möglichst viele Aspekte gleichzeitig untersuchen (u. a. Ausgangsmaterial und Herstellungsort

³⁰ Stiftung Risiko-Dialog, 2019

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

der Pflanzenkohle, Bodentyp, Bodenart, Veränderung von Bodenphysik, -chemie, Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt, Wasserverfügbarkeit, Bodenbiologie, Ertrag, Treibhausgasemissionen, Schadstoffe) sowie Lebenszyklusanalysen der Gesamtsysteme.³¹

Chancen, Akteure und Barrieren: In der Praxis wird Pflanzenkohle bislang meist zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit ausgebracht. In pflanzenbaulichen Versuchen konnten allerdings nicht in allen Fällen die Erträge gesteigert werden; der Effekt auf die Bodeneigenschaften ist v.a. stark vom Bodentyp abhängig. Auch in Bezug auf die Wasserspeicherkapazität oder die langfristige Wirkung auf Treibhausgasemissionen (CO₂, N₂O, CH₄) gibt es widersprüchliche Einschätzungen, teils mit positiven, teils mit neutralen oder negativen erzielten Effekten.

In der Schweiz ist der Verkauf von Pflanzenkohle (derzeit ohne Mengenbeschränkung) nach einer Bewilligung durch das BLW zugelassen, sofern sie die Anforderungen des European Biochar Certificate (EBC) «premium» einhält. Mit dieser Qualitätsanforderung soll vermieden werden, dass Schadstoffe in die Böden gelangen und sich dort anreichern. Der Verkaufspreis für eine Tonne Pflanzenkohle liegt in der Schweiz gegenwärtig in der Grössenordnung von 1000 Franken. Der hohe Preis hemmt die grossflächige Anwendung.

Die Basler Energieversorgerin IWB hat angekündigt, mit einer neuen Pyrolyse-Anlage ab Winter 2020/21 jährlich 2,7 Mio. kWh Wärme (entspricht der Versorgung von rund 300 Haushalten) in das Fernwärmenetz einzuspeisen und zudem rund 570 Tonnen Pflanzenkohle zu produzieren. Die Stadt Zürich prüft den Einsatz einer Pyrolyse-Anlage im Rahmen ihres Netto-Null Ziels 2030. Grundsätzlich bietet die Kopplung einer Pyrolyse-Anlage mit einem Energieverbraucher und CCS die Möglichkeit, Biomasse vielfältig zu nutzen und zugleich Kohlenstoff im Erdboden und CO₂ im tiefen Untergrund einzulagern. Um das genannte Senkenpotenzial möglichst auszuschöpfen, müssten die oben erwähnten Unklarheiten weiter untersucht werden und Rahmenbedingungen für einen starken Ausbau von Pyrolyseanlagen geschaffen werden.

Ausland: Das weltweite Senkenpotenzial von Pflanzenkohle ist – ähnlich wie bei der Kohlenstoffspeicherung im Boden (s. oben) – wegen der unterschiedlichen Standortverhältnisse, der fehlenden Feldversuche im grossen Massstab und der Konkurrenz um die Nutzung von Biomasse (Landwirtschaft, Energie, alternative CO₂-Speicherungen) schwer einzuschätzen. Wegen fehlender etablierter Mess- und Kontrollmechanismen ist eine Anrechnung an die Klimaziele der Schweiz fraglich. Ausgesuchte Pflanzenkohleprojekte im Ausland, die zusätzlich zur CO₂-Speicherung weitere positive Effekte wie eine nachhaltige Energieversorgung erzielen, sind im Sinne eines nachhaltigen weltweiten Klimaschutzes sinnvoll und werden vom Bund beispielsweise im Rahmen von REPIC³² unterstützt.

Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS)

Potenzial: BECCS kombiniert die Nutzung von Bioenergie (Wärme und Strom), etwa aus einem Holzheizkraftwerk, mit der bekannten, aber weltweit noch wenig angewendeten CO₂-Abscheidung am «Kamin» und der anschliessenden geologischen Speicherung im tiefen Untergrund (CCS). Würde die nachhaltige nutzbare Biomasse³³ vollständig mittels BECCS genutzt, wäre eine theoretische Senkenleistung von 5,1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr denkbar.³⁴ Entsprechend könnten dann jedoch andere biologische Ansätze wie Wald- und Holznutzung oder Pflanzenkohle keine *zusätzlichen* Senkenpotenziale liefern, weil die verfügbare Biomasse bereits vollständig durch BECCS beansprucht würde.

Biomasse wird bereits heute in der Schweiz über verschiedene Wege energetisch genutzt: in Kehrichtverbrennungsanlagen (Abfall zu rund 50 Prozent biogen, was rund 2,1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr entspricht), Kläranlagen, Holzheizkraftwerken und Holzwärmeverbänden oder Biogasanlagen. Das

³¹ Umweltbundesamt, 2016: *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden*. Verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-risiken-des-einsatzes-von-biokohle-anderer.

³² REPIC: Förderung der erneuerbaren Energien, der Energie- und Ressourceneffizienz in Entwicklungs- und Transitionsländern. Eine interdepartementale Plattform der Bundesämter SECO, DEZA, BAFU und BFE, s. www.repic.ch.

³³ Die verfügbare und zusätzlich nutzbare Trockenbiomasse wird auf 2,8 Mio. Tonnen geschätzt. Vgl. WSL, 2017: *Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung: Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET*. Verfügbar unter www.wsl.ch > Publikationen.

³⁴ Stiftung Risiko-Dialog, 2019

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

aus diesen Verfahren emittierte CO₂ könnte mittels BECCS abgeschieden und gespeichert werden. Wenn zukünftig auch Pflanzenkohle im grossen Massstab hergestellt würde, könnte auch das in den Pyrolyseabgasen anfallende CO₂ mittels BECCS dauerhaft gelagert werden.

Risiken: Grundsätzlich steht die umfangreiche Nutzung von Biomasse für BECCS im Konflikt mit anderen Bedürfnissen wie der Nahrungsmittelproduktion und dem entsprechenden Land-, Wasser- und Nährstoffbedarf. Die Biomasse darf nur aus nachhaltigen Quellen stammen, wenn man die Schäden für Ökosysteme und Tiere minimieren will. CCS benötigt Energie in Form von Wärme und Strom und Rohstoffe (z. B. für allfällige CO₂-Transportpipelines), die möglichst klimaneutral hergestellt werden müssen, um den Klimaschutzbeitrag zu maximieren. Nur vollständige Lebenszyklusanalysen über die ganze Produktionskette, die jedoch anspruchsvolle Abgrenzungsfragen beinhalten, können den effektiven Klimaschutzbeitrag bestimmen.

Obwohl es im Schweizer Untergrund ein *theoretisches* CO₂-Speicherpotenzial von total rund 2'500 Mio. Tonnen CO₂ geben könnte – vornehmlich im Mittelland in sogenannten salinen Aquiferen in 800–2'500 Meter Tiefe (durchlässige Gesteinsschichten, deren Poren und Risse salziges Wasser führen)³⁵ – ist das *realisierbare* Potenzial bzw. die realisierbare jährliche Senkenleistung zurzeit unbekannt, weil Feldversuche fehlen. Mit kontrollierten Feldversuchen nach etablierten internationalen Standards müsste erst nachgewiesen werden, dass geologische CO₂-Speicher in der Schweiz erschliessbar sind; gleichzeitig könnten mit diesen Versuchen mögliche Gefahren wie Erschütterungen oder der Austritt von CO₂ aus dem Speicher überprüft und minimiert werden. Aktuell existieren weder öffentliche Förderprogramme noch regulatorische Anreize zur Erforschung des inländischen geologischen CO₂-Speicherpotenzials. Dennoch gibt es bereits heute Forschungsaktivitäten diesbezüglich: Seit 2011 führt die zur swisstopo gehörende Landesgeologie im Felslabor Mont Terri CO₂-Experimente im Opalinuston durch, zusammen mit internationalen Partnern des Mont Terri Konsortiums. Der Opalinuston hat nicht nur hervorragende Eigenschaften als Wirtsgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle, sondern kann auch als Deckgestein für die geologische Speicherung von CO₂ dienen. Dieses Deckgestein spielt eine Schlüsselrolle bei der Beurteilung, ob die CO₂-Speicherung in den darunterliegenden Speichergesteinen langfristig eine sichere und effektive Lösung darstellt. Der im Labor Mont Terri untersuchte Opalinuston soll in der Rolle als Deckgestein verhindern, dass Gase wie CO₂ aus der Lagerstätte ungehindert in die Biosphäre aufsteigen. Opalinuston ist im Untergrund des Schweizer Mittellandes und im Jura verbreitet. Somit ist das Labor Mont Terri ein weltweit einzigartiger Ort, um sicherheitsrelevante Aspekte im Zusammenhang mit der Einlagerung von CO₂ zu untersuchen. Eine Ausweitung der internationalen Forschungskollaboration in Mont Terri bietet sich an.

Chancen, Akteure und Barrieren: CCS ist eine aus der Energiewirtschaft und Industrie bekannte und erprobte Technologie, um CO₂ dauerhaft und sicher zu speichern (s. Kasten 1). Die Schweizer Wirtschaft verfügt über ein gewisses Know-how im Bereich der CCS-Komponenten, Hoch- und Fachhochschulen sind stark in der Forschung aktiv. Es existiert heute noch keine BECCS-Anlage in der Schweiz.

Der Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) hat jedoch im Mai 2019 die Entwicklung von CCS im Abfallsektor im Rahmen des Konzepts «Carbon Hub» zur Diskussion gestellt.³⁶ Denkbar wäre nach dem VBSA, zeitnah an einer Schweizer KVA die Abscheidung von CO₂ zu erproben. Die Kosten dafür werden auf rund 70 Franken pro abgeschiedene Tonne CO₂ geschätzt. Offen bleibt, wie und wo das abgeschiedene CO₂ gelagert werden könnte. Für den Transport zu einer in- oder ausländischen Lagerstätte wären Schiene, Schiff oder neu zu bauende CO₂-Pipelines denkbar. Die zusätzlichen Kosten für Transport und Lagerung in der Nordsee schätzt der VBSA auf rund 340 Franken pro Tonne CO₂ für Pilotanlagen, die in den nächsten zehn Jahren auf rund 110 Franken pro Tonne CO₂ sinken könnten. Der VBSA bezeichnet Anlagen als «Carbon Hubs», die grosse Mengen CO₂ emittieren, abscheiden und in ein möglicherweise zukünftig europaweites CO₂-Transportnetz

³⁵ Bundesamt für Energie BFE, 2010: *Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz*. Verfügbar unter www.aramis.admin.ch, Projektnummer 102922.

³⁶ VBSA, 27. Mai 2019: *Das Konzept «Carbon Hub»: Der VBSA stellt einen klimapolitischen Vorschlag zur Diskussion*. Verfügbar unter <https://vbsa.ch/das-konzept-carbon-hub-der-vbsa-stellt-einen-klimapolitischen-vorschlag-zur-diskussion/>.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

hin zu einer geologischen Lagerstätte einspeisen. Neben den rund 40 KVAs als potenzielle «Carbon Hubs» aus dem Kreis der VBSA-Mitglieder wäre auch der Anschluss von industriellen «Carbon Hubs» wie Zementfabriken denkbar. Ein solches Konzept würde also zur Vermeidung von fossilem CO₂ wie auch zur Erzeugung von negativen Emissionen aus biogenem Abfall beitragen.

Generell gehört BECCS wegen der nötigen technischen Abscheidung, dem Transport und der geologischen Lagerung von CO₂ zu den teureren NET-Ansätzen. Anwendungen an grossen Anlagen (z. B. KVA) und der koordinierte Aufbau einer Transport- und Lagerungsinfrastruktur für CO₂, wie es das «Carbon Hub» Konzept des VBSA vorsieht, könnten die Kosten senken.

Gemäss Schätzungen des Bundesamts für Energie BFE würden sich bei einer erfolgreichen Erschliessung von fünf CO₂-Speicherstandorten in der Schweiz, die jährlich gesamthaft rund 1–2,5 Mio. Tonnen CO₂ speichern könnten, mit den zusätzlichen Betriebs- und Überwachungskosten die totalen Speicherkosten voraussichtlich auf 10–30 Franken pro Tonne CO₂ belaufen.

Geologische Erkundungen im Rahmen von Schweizer Geothermieprojekten könnten grundsätzlich auch genutzt werden, um CO₂-Speicherpotenziale zu untersuchen, da die Erkundungsmethoden in beiden Fällen ähnlich sind. Zurzeit gibt es jedoch keine Anreize für Geothermie-Projektanten, um zusätzliche Ressourcen für die Untersuchung von CO₂-Speicherpotenzialen aufzuwenden. Der geologische Dienst der Schweiz, angesiedelt bei swisstopo, ist von Seiten Bund stark involviert in der Erkundung nach Geothermie-Ressourcen. Auch die Erkundung nach geologischen CO₂ Speichern lässt sich aus seinen Rechtsgrundlagen als Aufgabe ableiten. Er ist daher ideal situiert, um bei der Nutzung der angesprochenen Erkundungs-Synergien eine wichtige Rolle zu spielen.

Ausland: Die einzige grosse BECCS-Demonstrationsanlage weltweit ist in den USA (Illinois); sie speichert seit 2017 rund 1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Bioethanolproduktion vor Ort im Untergrund.³⁷ Im Jahr 2019 wurde im Vereinigten Königreich die weltweit erste CO₂-Abscheidung an einem Biomassekraftwerk (Drax Power Station) demonstriert; mögliche Zwischennutzungen für das CO₂ (CCU) und die Speicherung in der Nordsee werden geprüft.³⁸ Die CO₂-Abscheidung an KVAs wird zurzeit in Norwegen, den Niederlanden, Schweden und Japan pilotiert.³⁹

Für die geologische CO₂-Speicherung in Europa im grossen Massstab bieten sich aktuell erschöpfte Erdgasstätten und insbesondere saline Aquifere unter der Nordsee an. Das Konsortium «Northern Lights» (Equinor, Shell, Total) will ab 2024 mit Unterstützung des norwegischen Staates den Transport von verflüssigtem CO₂ und Speicherkapazitäten unter der Nordsee (bis zu 5 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr) für europäische Kunden anbieten.⁴⁰ In den Niederlanden arbeitet ein Konsortium der öffentlichen Hand daran, im Rahmen des CCS Projektes «Porthos» CO₂-Transport und Speichermöglichkeiten in der Nordsee für die Industrie rund um den Hafen von Rotterdam aufzubauen; ab 2023 sollen rund 2 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr gespeichert werden können.⁴¹ Ähnliche Pläne gibt es auch im Vereinigten Königreich, wo ein von der britischen Regierung gefördertes Projekt eine Lizenz für die CO₂-Speicherung unter der Nordsee erhalten hat.⁴²

Der Export von CO₂ ins Ausland zur Speicherung im tiefen Meeresboden sind zurzeit völkerrechtlich durch Artikel 6 des Protokolls von 1996 zum Übereinkommen von 1972 über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (London Protokoll)⁴³ reguliert. Eine im Jahr 2009 angenommene Änderung des London Protokolls sollte dieses Verbot aufheben; es ist jedoch noch nicht in Kraft, da bisher nur sechs (Norwegen, Niederlande, Vereinigtes Königreich, Iran, Estland und Finnland) der nötigen 34 Vertragsparteien die Änderung ratifiziert haben. Im Oktober 2019 wurde eine provisorische Anwendung der Änderung von 2009 vereinbart, die es nun

³⁷ S. Medienmitteilung der Archer Daniels Midland Company vom 4. Juli 2017: www.adm.com/news/news-releases/adm-begins-operations-for-second-carbon-capture-and-storage-project-1.

³⁸ S. Medienmitteilung von Drax vom 7. Februar 2019: www.drax.com/press_release/world-first-co2-beccs-ccus/.

³⁹ IEAGHG 2020/06: CCS on Waste to Energy (Publikation ausstehend)

⁴⁰ S. <https://northernlightsccs.com>

⁴¹ S. www.rotterdamccus.nl/en/

⁴² S. <https://theacornproject.uk/>

⁴³ SR 0.814.287.1

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

denjenigen Staaten, die eine Erklärung zur vorläufigen Anwendung der Änderung von 2009 abgeben, erlaubt, CO₂ zum Zweck der geologischen Speicherung zu exportieren.⁴⁴

Nach aktuellem Stand scheint es eher unwahrscheinlich, dass die Schweiz sich in Zukunft direkt an einer ausländischen BECCS-Anlage beteiligen könnte, da ausländische Staaten diese negativen Emissionen zusehends an ihre eigenen Reduktionsziele werden anrechnen wollen. Hingegen wäre mittelfristig der Export von in der Schweiz abgeschiedenem CO₂ aus biogenen Quellen zwecks geologischer Speicherung im Ausland im Sinne des «Carbon Hub» Ansatzes des VBSA denkbar (wobei auch die nötige CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut werden müsste). Für den CO₂-Export zur Speicherung im tiefen Meeresboden müsste die Schweiz jedoch im Rahmen des London Protokolls noch die nötigen völkerrechtlichen Bedingungen schaffen (Hinterlegung Urkunde zur Annahme der Änderung von 2009 sowie Erklärung derer vorläufigen Anwendung).

Maschinelle CO₂-Luftfiltrierung und Speicherung (DACCS)

Potenzial: Mit chemischen Verfahren kann CO₂ direkt aus der Umgebungsluft gefiltert und geologisch gespeichert werden. Das theoretische DACCS-Senkenpotenzial ist, wie bei BECCS (s. oben), grundsätzlich durch die verfügbare geologische Speicherkapazität begrenzt, aber wegen fehlender Feldversuche zurzeit letztlich unbekannt. Anders als bei CCS, wo CO₂ an einer Punktquelle mit hoher CO₂-Konzentration abgeschieden wird, muss bei *Direct Air Carbon Capture* DACC deutlich mehr Energie insb. in Form von Prozesswärme aufgewendet werden, um CO₂ aus der Umgebungsluft einzufangen. Nur wenn diese Energie aus nachhaltigen Quellen gewonnen werden oder ohnehin anfallende industrielle Abwärme genutzt werden kann, ist dem Klima effektiv gedient. Je nach Verfahren ist der Wasserverbrauch hoch, was das Potenzial zusätzlich einschränken kann.

Risiken: Wie bei BECCS sind auch bei DACCS vollständige Lebenszyklusanalysen notwendig, um insbesondere angesichts des hohen Energiebedarfs (und allenfalls des Wasserbedarfs) den Klimaschutzbeitrag korrekt bestimmen zu können. Auch bei der geologischen Speicherung im Inland existieren die gleichen Risiken wie bei BECCS.

Chancen, Akteure und Barrieren: Die erste kommerzielle DACC Anlage weltweit (ohne Speicherung) steht seit Mai 2017 in Hinwil bei Zürich. Sie wird von Climeworks, einem 2009 gegründetem Spin-off der ETH Zürich, betrieben und scheidet jährlich rund 900 Tonnen CO₂ aus der Luft ab, das im Sinne eines CCU-Ansatzes an ein nahegelegenes Gewächshaus für besseres Pflanzenwachstum geliefert wird (was in diesem Fall höchstens zu einem CO₂-neutralen Effekt führt, da das CO₂ nicht dauerhaft gespeichert wird, s. Kasten 1). Die Climeworks-Technologie kommt mit niederen Temperaturen aus (80–120 Grad Celsius) und braucht kein Wasser. Im Fall der Anlage in Hinwil wird die Restwärme einer KVA genutzt. Climeworks setzt auf skalierbare Module, die gerade im Vergleich mit anderen NET-Ansätzen wenig Land brauchen. Climeworks beziffert die aktuellen Kosten für DACCS (inkl. Speicherung) auf 600–800 Franken pro Tonne CO₂ und schätzt, dass diese in den nächsten Jahren aufgrund der technischen Entwicklungen und der Skaleneffekte auf rund 100 Franken pro Tonne CO₂ sinken könnte – vorausgesetzt, dass die Nachfrage stark steigt.

Bei DACC handelt es sich um die einzige CO₂-Abscheidungsform die, bis auf den Aspekt des Energieverbrauchs, nicht standortgebunden ist. Eine solche Anlage kann also genau dort platziert werden, wo geologische CO₂-Lagerstätten entwickelt werden. Somit entfällt der Transport von CO₂, wie er bei (BE)CCS nötig ist, weitgehend.

Ausland: Neben der Schweizer Firma Climeworks gibt es nur eine knappe Handvoll anderer Unternehmen, die DACCS entwickeln, u. a. Global Thermostat (USA; mit einem ähnlichen Niedertemperaturansatz wie Climeworks) und Carbon Engineering (Kanada; mit einem Hochtemperaturansatz von > 800 Grad Celsius und hohem Wasserverbrauch). Die erste DACCS Demonstrationsanlage weltweit

⁴⁴ S. Medienmitteilung der IMO vom 11. Oktober 2019: www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/LCLP/Pages/LC-41-LP-14-.aspx.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

(mit Speicherung) wurde 2017 in Island mit Modulen von Climeworks im Rahmen des von der EU geförderten Projekts «CarbFix2» unter der Leitung von Reykjavik Energy eingerichtet.⁴⁵ Ein Geothermiekraftwerk vor Ort liefert Strom und Wärme für den DAC-Process. Das abgeschiedene CO₂, das vor Ort in den Untergrund gepumpt wird, reagiert mit dem lokalen basaltischen Gestein und wird in kurzer Zeit fest. An geeigneten Standorten (z. B. Island mit vorhandener CO₂ Transport- und Speicherinfrastruktur) betragen die Speicherkosten rund 25–50 Euro pro Tonne CO₂.⁴⁶ Weitere geeignete basaltische Gesteinsformationen für die CO₂-Speicherung gibt es u. a. im Mittleren Osten, Indien, Südafrika und im Nordwesten der USA.

Für die Schweiz könnten in Zukunft Beteiligungen an ausländischen DACCS Projekten an energetisch und geologisch optimierten Standorten eine interessante Möglichkeit sein, um negative Emissionen für das Schweizer Netto-Null Ziel «einzukaufen». Dies kann jedoch mittelfristig nur zu interessanten Kosten erfolgen, wenn die Marktbedingungen rasch und deutlich verbessert werden.

Beschleunigte Verwitterung (via Zement)

Potenzial: Verwitterndes Gestein kann auf natürliche Weise CO₂ binden. Dieser Effekt wird auch bei verbautem Beton beobachtet. Dabei wird die chemische Reaktion, die bei der Zementherstellung CO₂ freisetzt, teilweise wieder rückgängig gemacht (sog. Rekarbonatisierung).⁴⁷ Der Branchenverband cemsuisse geht davon aus, dass rund 15 Prozent der CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung durch verbauten Beton auf natürliche Weise während seiner Lebensdauer, inkl. Abbruch, wieder chemisch gebunden werden. Dieser natürliche Prozess kann gezielt mit technischen Mitteln verstärkt werden. Mit den aktuellen Abbruchmengen und heute verfügbaren Verfahren könnten theoretisch rund 75'000 Tonnen CO₂ pro Jahr zusätzlich gespeichert werden. Bis 2050 wäre mit zunehmendem Betonabbruch ein theoretisches Senkenpotenzial von bis zu 2,5 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr denkbar, wenn aller in der Schweiz abgebrochene Beton gezielt und vollständig rekarbonatisiert würde.

Risiken: Nach aktuellem Wissen scheint die Rekarbonatisierung von Beton keine nennenswerten Risiken für Umwelt oder Menschen darzustellen. Wie bei allen anderen NET-Ansätzen auch, sind jedoch vollständige Lebenszyklusanalysen notwendig, um den Klimaschutzbeitrag korrekt bestimmen zu können.

Chancen, Akteure und Barrieren: Die chemische Bindung von CO₂ in Abbruchbeton ist sehr stabil und verspricht eine lange CO₂-Speicherung, möglicherweise über Jahrhunderte. In der Schweiz arbeiten Unternehmen wie Sika Technologies oder Neustark, ein Spin-off der ETH Zürich, an solchen Ansätzen. Neustark hat im Jahr 2019 eine Pilotanlage in Bern realisiert und plant im Jahr 2020 eine Demonstrationsanlage im kommerziellen Massstab. Der limitierende Faktor für eine grossflächige Umsetzung in der Schweiz sind zurzeit die Kosten verbunden mit einer mangelnden Nachfrage.

Ausland: International arbeiten u. a. die Unternehmen Carbon Cure (Kanada) mit einem marktreifen Verfahren und Blue Planet (USA) an der beschleunigten Rekarbonatisierung von Beton. Grundsätzlich wäre neben der Rekarbonatisierung von Beton auch denkbar, anderes geeignetes Gestein (Silikate und Karbonate) fein gemahlen über die Erdoberfläche zu verteilen, um CO₂ aus der Atmosphäre zu binden. Es fehlen jedoch Feldversuche, um die CO₂-Speicherleistung und den Einfluss auf die betroffenen Böden, Grundwasser und Ökosysteme fundierter zu beurteilen. Wegen der technischen «Unreife» scheinen Beteiligungen der Schweiz an internationalen Projekten in nächster Zeit unwahrscheinlich.

⁴⁵ S. www.carbfix.com/carbfix2.

⁴⁶ Ingvi Gunnarssona et. al., 2018: *The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site*. International Journal of Greenhouse Gas Control 79, 117–126. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>.

⁴⁷ Bei der Zementherstellung wird aus Kalkstein Zementklinker und CO₂ erzeugt (CaCO₃ → CaO + CO₂). Bei der Rekarbonatisierung des Zements wird mit der umgekehrten chemischen Reaktion CO₂ wieder gebunden.

Kasten 3: Weitere Ideen für negative Emissionen – Könnten Ansätze wie die Ozeandüngung von Bedeutung für die Schweiz sein?

Auch die Ozeane könnten durch menschliches Einwirken theoretisch noch mehr CO₂ aus der Atmosphäre binden, als sie natürlicherweise schon tun. Diskutiert werden u. a. die beschleunigte Verwitterung von Mineralien im Ozean und die Düngung der Ozeane mit Nährstoffen wie Eisen, um das Wachstum von Algen und die Bindung von CO₂ darin zu beschleunigen. Diese Ansätze sind kaum oder noch gar nicht getestet worden. Entsprechend ist unklar, in welchem Umfang solche Ansätze tatsächliche dauerhaft CO₂ speichern könnten und wie sie auf die Meeresökosysteme wirken könnten.

Das London Protokoll reguliert aufgrund einer Änderung von 2013 auch «*marine geoengineering*», worunter auch NET mit Bezug zum Ozean fallen. Die Ozeandüngung ist gemäss dieser Änderung verboten, ausser zu (bewilligungspflichtigen) Forschungszwecken. Diese Änderung ist jedoch nicht in Kraft, da nur sechs Vertragsparteien diese bisher ratifiziert haben. Auch die Vertragsparteien zum Übereinkommen über die biologische Vielfalt von 1992⁴⁸ haben sich 2008 gegen die kommerzielle Ozeandüngung ausgesprochen.⁴⁹ Diese Entscheide werden weitgehend als *de facto* Moratorium für die kommerzielle Ozeandüngung angesehen.

Angesichts dieser Ausgangslage ist es unwahrscheinlich, dass Ansätze wie die Ozeandüngung für die Schweiz von Bedeutung sein werden zur Erreichung des Netto-Null Ziels 2050. Die Schweiz wird sich jedoch dafür einsetzen, dass auf internationaler Ebene auch für solche Ansätze die Diskussionen um Gouvernanzbedürfnisse weitergeführt werden (s. Kasten 2 und Ziffer 3).

2.3 Zwischenfazit zum Potenzial für die Schweiz

Die diskutierten CO₂-Speicher können grundsätzlich nur eine begrenzte Menge CO₂ aufnehmen – und nicht alle können sie gleich gut über längere Zeit, also möglichst dauerhaft, speichern.

Die Aufnahmekapazität biologischer Speicher (Vegetation, Boden), d.h. die Steigerung des Kohlenstoffvorrats über das aktuelle Niveau hinaus, ist in der Schweiz eng begrenzt – mangels neu zu bestockender Flächen, aufgrund einer bereits hohen Bestandsdichte in den Wäldern sowie bereits relativ hoher Bodenkohlenstoffvorräte. In vielen ausländischen Regionen finden sich diesbezüglich günstigere Voraussetzungen. Das Vorsorgeprinzip gebietet, biologische Speicher nicht als Kompensation für vermeidbare Treibhausgasemissionen zu füllen, solange nicht klar ist, ob die technischen Ansätze wie BECCS oder DACCS im benötigten Umfang negative Emissionen generieren können. Gesättigte Speicher stehen (später) nicht mehr zur Verfügung, um schwer vermeidbare Emissionen, etwa aus der Landwirtschaft, auszugleichen. Biologische Senken sind reversibel, und dieses Risiko ist bei Senkenprojekten im Landnutzungssektor (Wald, Boden) immer präsent. Das CO₂ muss aber dauerhaft gespeichert werden, damit klimawirksame negative Emissionen erzeugt werden können. Dies muss bei einer allfälligen Anrechnung an die Klimaziele der Schweiz berücksichtigt werden. Dazu muss auch ein Konsens entwickelt werden, was «dauerhaft» bedeutet. Aus Klimasicht sind mehrere Jahrzehnte ein Minimum. Auf der Plusseite steht, dass der Aufbau biologischer Senken – bei überschaubaren Risiken – willkommene Synergieeffekte z. B. bzgl. Produktivität oder ökologischer Qualität eines Standorts mit sich bringt.

Bei den geologischen Senken, die bei BECCS und DACCS zur Anwendung kommen, scheinen die identifizierten theoretischen Speicherkapazitäten gegenwärtig sowohl in der Schweiz (ca. 60 CO₂-Jahresemissionen) als auch weltweit die voraussichtliche Nachfrage bis auf Weiteres abdecken zu können. Man geht davon aus, dass eine dauerhafte Einlagerung des CO₂ in salinen Aquiferen im tiefen Untergrund (mehrere Jahrhunderte im Minimum) oder mittels mineralischer Fixierung in basaltischen

⁴⁸ SR 0.451.43

⁴⁹ Decision IX/16 adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its ninth meeting, May 2008.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Gesteinen (unbegrenzt) bei Anwendung der bestverfügbaren Praxis möglich ist. In der Schweiz wurden aber bisher geologische CO₂-Speicher weder erkundet noch erschlossen. Zusätzlich müsste eine CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut werden. Schliesslich müssten BECCS und DACCS in beschleunigtem Masse den Markt durchdringen.

Viele grundlegende Fragen an die Umsetzung von NET, wie Kosten, Umweltauswirkungen oder Zielkonflikte, sind auf nationaler wie auch internationaler Ebene nicht ausreichend geklärt. Entsprechend können kaum belastbare Aussagen zu den *nachhaltig realisierbaren* Potenzialen einzelner NET in der Schweiz gemacht werden. Zudem sind alle diskutierten Verfahren entweder in der Praxis noch nicht erprobt oder nicht einsatzbereit in dem Ausmass, das für die Klimaziele benötigt wird. Um diesen Wissensdefiziten zu begegnen, müssten die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zu NET massiv hochgefahren werden.

3 Handlungsoptionen

Der enorme Handlungsbedarf im Bereich von NET, der sich international und national aus dem Übereinkommen von Paris ergibt, erschliesst sich erst langsam breiteren politischen und gesellschaftlichen Kreisen. Um das Schweizer Netto-Null Ziel bis 2050 zu erreichen, müssen innerhalb von 30 Jahren in der Schweiz nicht nur die Treibhausgasemissionen in allen Sektoren auf ein Minimum reduziert werden, sondern es müssen auch Kapazitäten für nachhaltige biologische und technische CO₂-Senken im Umfang von mehreren Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aufgebaut werden.

Entsprechend wäre es bereits jetzt zu prüfen, inwiefern neben den Rahmenbedingungen für eine massive Treibhausgasreduktion auch jene für den nötigen starken Ausbau von NET gesetzt werden können. Dies hätte im Einklang mit den globalen Nachhaltigkeitszielen (*Sustainable Development Goals*) der UNO zu erfolgen. Zudem gilt es, die grundlegenden Prinzipien des Umweltrechts zu beachten: das Vorsorgeprinzip («Vorbeugen ist besser als heilen»), das Verursacherprinzip («*polluter pays principle*»), die Bekämpfung an der Quelle (Umweltschäden sollen möglichst gar nicht entstehen), die ganzheitliche Betrachtungsweise (Umweltbelastung als Ganzes reduzieren) und das Kooperationsprinzip (Entwicklung und Umsetzung gemeinsam mit Parteien, Kantonen, der Wirtschaft und Gesellschaft).⁵⁰ Das Netto-Null Ziel bis 2050 soll weiter möglichst kosten- und ressourceneffizient erreicht werden.

Nach aktuellem Stand des Wissens könnten im Sinne eines Portfolioansatzes verschiedene NET-Ansätze parallel untersucht und vorangetrieben werden, um die Chancen für eine erfolgreiche und nachhaltige Nutzung in den zukünftig benötigten Mengen zu erhöhen. Auch Massnahmen, die nicht direkt zum Schweizer Netto-Null Ziel beitragen, aber anderen Staaten und Akteuren helfen, NET auszubauen, kommen der Schweiz zugute: sie bremsen den globalen Klimawandel und erhöhen die globale Nachfrage nach NET-Lösungen, die die Schweiz – wenn sie sich gut aufstellt – mit innovativer Forschung, Produkten und Dienstleistungen bedienen könnte.

Je nach Reifegrad eines NET-Ansatzes kann an unterschiedlichen Punkten im Innovationszyklus angesetzt werden, um die Entwicklung zügig voranzutreiben: angebotsseitig bei der Forschung bis zur kommerziellen Skalierung und nachfrageseitig bei den Marktbedingungen (s. Abbildung 6). Je nach Ansatzpunkt kann dies durch verschiedene Akteure erfolgen (Bund, Kantone, Gemeinden, Wirtschaftsakteure, Forschungsinstitutionen etc.).

⁵⁰ BAFU, 2013: *Umweltrecht kurz erklärt*. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Umweltrecht > Publikationen und Studien.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

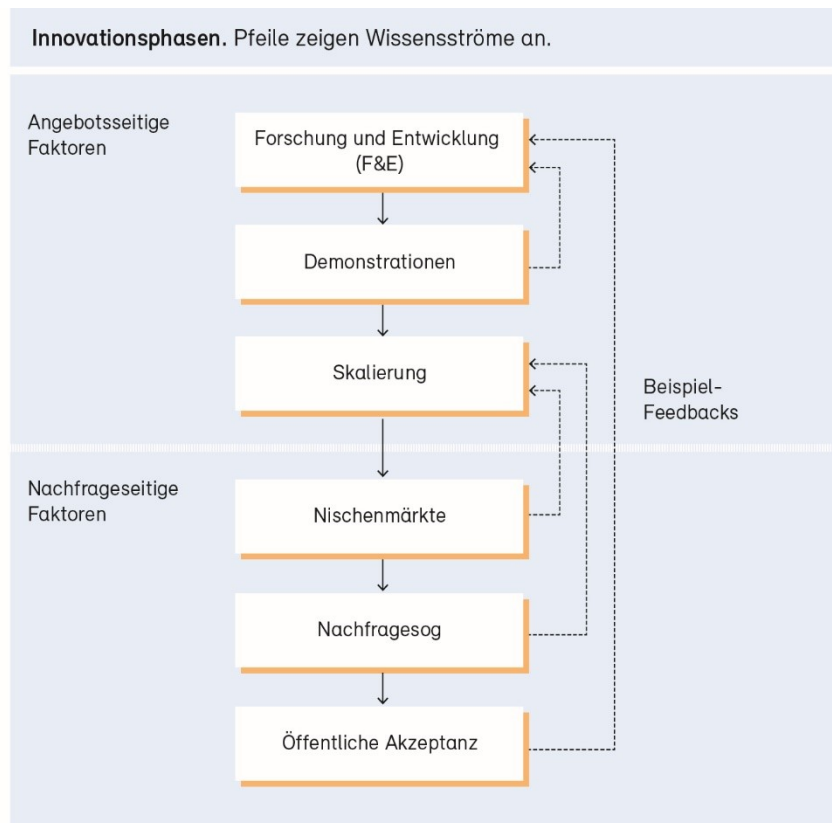


Abbildung 6: Die Erforschung und Entwicklung bis hin zur Marktdurchdringung von Negativemissionstechnologien kann an unterschiedlichen Punkten im Innovationszyklus mit angebots- und nachfrageseitigen Massnahmen unterstützt werden. BAFU-Darstellung gestützt auf Gregory F. Nemet et. al.⁵¹

Nationale Ebene

Auf nationaler Ebene gilt es zu prüfen, wie das Verständnis bei Bund, Kantonen und Gemeinden für die Bedeutung von NET weiter gestärkt werden könnte. Der Ausbau von NET tangiert neben der «klassischen» Klimapolitik weitere Bereiche der öffentlichen Hand, wie Agrar- und Waldpolitik, Energiepolitik, Abfall, Regulierung des Untergrundes, (CO₂-)Transportinfrastruktur, Forschungsförderung und Technologietransfer. Innerhalb der Bundesverwaltung wird daher geprüft, wie der Austausch und nötige Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Interdepartementalen Ausschusses Klima (IDA Klima) unter der Federführung des BAFU institutionalisiert und koordiniert werden könnte. Dazu könnte eine NET-Roadmap entwickelt werden, die im Einklang mit der langfristigen Klimastrategie konkreter aufzeigt, wie die nötigen negativen Emissionen bis 2050 aufgebaut werden können. In diesem Zusammenhang müssten auch die nachhaltig realisierbaren Potenziale genauer überprüft werden sowie der geeignete Einbezug von weiteren Stakeholdern bspw. aus der Forschung und der Wirtschaft. Es kann auch geprüft werden, wie der NET-Aufbau von gezielten Kommunikationsmassnahmen gegenüber der Öffentlichkeit begleitet werden kann, um im Dialog mit dieser das Verständnis und die Akzeptanz wo nötig zu verbessern.

Die öffentliche Hand kennt bereits eine breite Palette von Gefässen zur Forschungs- und Innovationsförderung (z. B. Schweizerischer Nationalfonds, Akademien der Wissenschaften, Innosuisse, Ressortforschung), die verstärkt auch für die Erforschung und Förderung von NET, beispielsweise im Rahmen gezielter Programmforschung, genutzt werden könnten. Ebenso stehen für die Erforschung von NET Forschungsinfrastrukturen wie ICOS (*Integrated Carbon Observation System*), EPOS (*European Plate Observing System*) und ECCSEL (*European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure*) zur Verfügung, die nicht nur auf nationaler, sondern auch auf internationaler Ebene wichtige

⁵¹ Gregory F. Nemet et. al., 2018 : *Negative emissions – Part 3: Innovation and upscaling*. Environmental Research Letters 13, 063003. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff4>.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

Impulse für die multidisziplinäre Forschung liefern.⁵² Auch relevante themenspezifische öffentliche Fonds und Programme, wie die Forschungs- und Innovationsförderung des BFE, die Umweltforschung des BAFU (deren Konzept NET als prioritäres Forschungsthema für 2021–2024 auführt)⁵³, der neue im totalrevidierten CO₂-Gesetz angelegte Klimafonds oder die Ressortforschung des BLW könnten den Aufbau von NET als Förderziel berücksichtigen. Die Arbeiten der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope und der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL zu biologischen CO₂-Senken (und CO₂-Quellen) könnten vermehrt auch mit Blick auf einen möglichen nachhaltigen Senkenbeitrag bis 2050 ausgerichtet werden. Auch das Zusammenspiel von Wald- und Holzsektor könnte weiter erforscht werden, um das Potenzial negativer Emissionen in möglichst langlebigen Holzprodukten besser zu nutzen. Das Felslabor Mont Terri könnte vermehrt als internationalen Forschungshub im Bereich geologischer CO₂ Einlagerung positioniert werden, um den Know-how Transfer auf internationaler Ebene sicherzustellen. Neben den naturwissenschaftlichen und technischen Forschungsfragen wären vermehrt auch systemische Fragen (insb. Lebenszyklusanalysen) sowie sozial- und geisteswissenschaftliche Fragen (z. B. Akzeptanz, Gerechtigkeitsfragen) mit Bezug zu NET zu untersuchen.

Die in Ziffer 2.2 beschriebenen NET-Ansätze sind in der Schweiz grundsätzlich soweit ausgereift, dass sie in Pilot- oder Demonstrationsprojekten getestet werden können oder gar in Nischenmärkten funktionieren. Gerade im Bereich der Abfallverwertung, die weitgehend in der öffentlichen Hand ist, würde es sich anbieten, zeitnah Projekte im Sinne des «Carbon Hub» Konzepts des VBSA zu unterstützen, z. B. die Demonstration von CO₂-Abscheidung an einer KVA. Pilot- oder Demonstrationsprojekte sollten wo immer möglich mit Forschung zu den jeweiligen Lebenszyklusanalysen verbunden werden.

Der Bund – der mit dem Netto-Null Ziel den Bedarf nach NET erst schafft – spielt eine wichtige Rolle bei der Gestaltung der Nachfrageseite und der entsprechenden Märkte. Es gilt zu prüfen, wie er in der Klimapolitik und in anderen geeigneten regulatorischen Bereichen (z. B. Agrar-, Wald-, Holz- und Energiepolitik) möglichst kosteneffiziente und effektive Anreize schafft. Grundlegend zu prüfen wäre, ob getrennte Klimaziele, also ein Vermeidungs- bzw. Reduktionsziel und ein separates Ziel für negative Emissionen, die nötige klare Trennung liefern könnte, um gezielt wirksame Massnahmen für die unterschiedlichen Ziele entwickeln zu können.⁵⁴ Die Massnahmen könnten auf bekannten klimapolitischen Instrumenten wie dem Emissionshandel oder der CO₂-Lenkungsabgabe aufbauen, aber auch andere Instrumente wie CO₂-Standards, Quoten oder Ausschreibungen berücksichtigen. Wichtig für die Nachvollziehbarkeit, die Belastbarkeit und letztlich fürs Klima sind nationale Qualitätskriterien für dauerhafte und nachhaltige Senkenleistungen im Einklang mit aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zu prüfen ist auch, ob es bestimmte Aufgaben gibt, die am zweckmässigsten durch den Bund selbst wahrgenommen werden; allenfalls könnten dies Aufgaben im Zusammenhang mit einer möglichen nationalen CO₂-Transportinfrastruktur sein oder dem Aufbau einer nationalen, genossenschaftlich orientierten Organisation für die CO₂-Speicherung im Untergrund (ähnlich dem Konzept der Nagra⁵⁵). Eine solche Organisation könnte Synergien aus geothermischen Erkundungen im Inland (z. B. Charakterisierung des Untergrundes und Explorationsbohrungen) nutzen. Dazu könnten Anreize geschaffen werden, um die Erkundung nach geothermischen Ressourcen mit jener nach geologischer CO₂-Speicherung zu verbinden.

Internationale Ebene

Der Bund könnte prüfen, wie er internationale Forschungs- und Innovationskooperationen mit Bezug zu NET und dessen nachhaltiger Entwicklung unterstützen kann, z. B. im Rahmen einer Beteiligung

⁵² SBF, 2019: Schweizer Roadmap für Forschungsinfrastrukturen im Hinblick auf die BFI-Botschaft 2021–2024 (Roadmap Forschungsinfrastrukturen 2019). Verfügbar unter www.sbf.admin.ch > Forschung und Innovation > Forschungsinfrastrukturen.

⁵³ BAFU, 2020: Forschungskonzept Umwelt für die Jahre 2021–2024. Verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Bildung, Forschung, Innovation BFI > Publikationen und Studien.

⁵⁴ Vgl. bspw. Duncan P. McLaren et. al., 2019: *Beyond "Net-Zero": A Case for Separate Targets for Emissions Reduction and Negative Emissions*. *Frontiers in Climate*. Verfügbar unter <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00004>.

⁵⁵ Die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) ist das technische Kompetenzzentrum der Schweiz für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in geologischen Tiefenlagern.

Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein?

an Horizon Europe (dem Rahmenprogramm der EU für Forschung und Innovation 2021–2027), durch Beteiligung und Stärkung der Zusammenarbeit in Vorhaben des Europäischen Strategieforschungsforums für Forschungsinfrastrukturen (ICOS, EPOS und ECCSEL), durch aktive Mitwirkung im Energy Technology Network der Internationalen Energieagentur (IEA), sowie in multilateralen Verbänden nationaler Forschungs- und Innovationsförderorgane (z. B. *Accelerating CCS Technologies ACT*⁵⁶ und *Bio-energy Sustaining the Future BESTF*⁵⁷ im Rahmen des Instruments ERA-NET⁵⁸ unter Horizon 2020 sowie deren geplante Weiterentwicklung unter Horizon Europe).

Die Schweiz könnte die Änderung des London Protokolls von 2009 mittels Hinterlegung einer Urkunde zur Annahme sowie eine entsprechende Erklärung derer vorläufigen Anwendung prüfen, um den grenzüberschreitenden Transport von CO₂ zur Lagerung im ausländischen tiefen Meeresboden grundsätzlich zu ermöglichen.

Weiter gilt es zu prüfen, inwieweit er zukünftig unter dem Artikel 6 des Übereinkommens von Paris negative Emissionen von Partnerländern fördern und an die Reduktionsziele der Schweiz anrechnen lassen könnte und geeignete Pilotprojekte entwickeln.

Die Schweiz setzt sich bereits heute im Rahmen ihrer internationalen Aktivitäten für einen ambitionierten globalen Klimaschutz ein, der die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius beschränkt. In diesem Sinn kann der dringende Bedarf nach einem enormen globalen Ausbau von NET – zusätzlich zu den nötigen enormen Treibhausgasreduktionen – noch stärker thematisiert und möglichst mit konkreten Projekten angegangen werden, sei es in internationalen Foren, bilateralen Beziehungen oder der Entwicklungshilfe. Die Schweiz wird sich entsprechend auch weiterhin darum bemühen, in geeigneten internationalen Foren, insbesondere im Rahmen von UNEP, die Diskussion um das Wissen um NET und SRM sowie um Ansätze für eine wirksame internationale Gouvernanz weiter voranzutreiben (s. Kasten 2).

4 Fazit

Um die Klimaziele zu erreichen, sind negative Emissionen, also die forcierte Entnahme und dauerhafte Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre, unverzichtbar geworden. Will man die weltweite Erwärmung auf durchschnittlich 1,5 Grad Celsius begrenzen, um schwerwiegendste und irreversible Auswirkungen der Klimaerwärmung abzuwehren, so werden negative Emissionen in Zukunft ein wichtiges Instrument der Klimapolitik bilden.

In der Schweiz müssen aufgrund des Ziels des Bundesrates von Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050 – vorausgesetzt, dass die Emissionen in allen Sektoren massiv reduziert werden – voraussichtlich rund 10 Mio. Tonnen CO₂eq pro Jahr ab 2050 mit CCUS und negativen Emissionen neutralisiert werden.

Die Schweiz steht, wie praktisch alle anderen Staaten auch, beim Verständnis für die Bedeutung von NET und beim Ausbau der nötigen NET-Kapazitäten noch am Anfang. Im Vergleich zu vielen anderen Staaten ist die Schweiz aber dank ihrer Forschungs- und Innovationskraft und ihrem bisher aufgebauten Know-how gut aufgestellt, um eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von NET einzunehmen. Nun müssen die Weichen, auch durch den Bund, richtig gestellt werden, um die Potenziale von NET auf nachhaltige Weise im In- und Ausland freizusetzen.

⁵⁶ S. www.act-ccs.eu.

⁵⁷ S. www.eranetbestf.edu.

⁵⁸ S. www.sbf.admin.ch > Forschung & Innovation > Internationale Forschungs- und Innovationszusammenarbeit > Multilaterale Zusammenarbeit > ERANET.

Anhang: Abkürzungen

ACT	<i>Accelerating CCS Technologies</i> ; Initiative zur Forschungs- und Innovationsförderung im Bereich CCS
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BECCS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i> , Bioenergienutzung mit CO ₂ -Abscheidung und Speicherung
BESTF	<i>Bioenergy Sustaining the Future</i> ; Initiative zur Forschungs- und Innovationsförderung im Bereich Bioenergie
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> , CO ₂ -Abscheidung und Speicherung
CCU	<i>Carbon Capture and Utilisation</i> , CO ₂ -Abscheidung und Nutzung
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilisation and Storage</i> , CO ₂ -Abscheidung, Nutzung und Speicherung
CDR	<i>Carbon Dioxide Removal</i> , CO ₂ -Entnahme; Menschliche Aktivitäten zur Entfernung von CO ₂ aus der Atmosphäre und zur dauerhaften Speicherung
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalente
DACCS	<i>Direct Air Carbon Capture and Storage</i> , Maschinelle CO ₂ -Luftfiltrierung und Speicherung
ECCSEL	<i>European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure</i> ; Forschungsinfrastruktur im Bereich von CCS
EPOS	<i>European Plate Observing System</i> ; Forschungsinfrastruktur im Bereich der Erdwissenschaften
ICOS	<i>Integrated Carbon Observation System</i> ; Forschungsinfrastruktur zur Quantifizierung der Treibhausgasbilanz in Europa und angrenzenden Regionen
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , Weltklimarat
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
NET	Negativemissionstechnologie, in diesem Bericht gleichbedeutend mit <i>Carbon Dioxide Removal</i> (CDR)
SRM	<i>Solar Radiation Modification</i> , Solare Strahlungsmodifikation; Menschliche Aktivitäten zur Beeinflussung der solaren Strahlungsbilanz mit dem Ziel, die Erwärmung bzw. die Temperatur zu senken
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> , Umweltprogramm der Vereinten Nationen
VBSA	Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen