

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz



Zürich, 30.11.2022

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Klima, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Cyril Brunner, Reto Knutti, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.

Autor/Autorin: Cyril Brunner, Reto Knutti, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.

Begleitung BAFU: Sophie Wenger Hintz, Martin Jiskra

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag: Brunner C., Knutti R. (2022). Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern.

Abbildung auf der Titelseite:

Kehrichtverwertungsanlage (KVA) Horgen (eigene Abbildung), welche im Rahmen des Projekts Airfix so erweitert wird, dass durch den Betrieb der Anlage in der Bilanz CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wird.

Zusammenfassung

Die CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre (engl. Carbon Dioxide Removal, CDR) ist ein unverzichtbares Element, um Netto-Null CO₂- oder Treibhausgasemissionen zu erreichen. Die vorliegende Auftragsstudie schätzt das technische Potenzial sowie die Kosten der CDR-Methoden Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierte Waldbewirtschaftung, Biomasseenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung, Bodenkohlenstoffsequestrierung, Einlagerung von Pflanzenkohle, beschleunigte Verwitterung (ERW) sowie die direkte CO₂-Entfernung auf der Atmosphäre und Speicherung (DACs) in der Schweiz ab. Auch Möglichkeiten und Kosten für den Transport sowie die Speicherung von CO₂ im In- und Ausland werden abgeschätzt. Als Basis dient die bestehende wissenschaftliche Fachliteratur sowie Veröffentlichungen der Schweizer Bundesämter.

Das technische CDR-Potenzial in der Schweiz ohne DACs wird auf 30 MtCO₂-eq/Jahr geschätzt. Für DACs wurde keine Potenzialabschätzung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen gefunden. Das Potenzial für die geologische Speicherung in der Schweiz ist noch unzureichend geklärt. Damit fällt die vorliegende Abschätzung des technischen CDR-Potenzials deutlich höher aus als in früheren Abschätzungen, was primär daran liegt, dass in dieser Abschätzung neu auch ERW, die Holzernte sowie die bereits energetisch genutzte Biomasse in der Abschätzung enthalten sind. Durch mehrere limitierende Faktoren dürfte das tatsächlich realisierbare Potenzial für CDR in der Schweiz deutlich kleiner ausfallen als das genannte technische Potenzial. Die ökologischen und wirtschaftlichen Einschränkungen stellen jedoch einen substanziellen Beitrag von CDR innerhalb der Schweiz zum Erreichen eines Netto-Null-Ziels nicht grundsätzlich in Frage. Wie viel CDR in der Schweiz künftig effektiv zur Anwendung kommt, hängt zudem von den politischen-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, von der Klimapolitik, von den Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen sowie von der Einbindung der Bevölkerung ab.

Die geschätzten Kosten variieren mit ca. -40 bis 930 CHF/tCO₂-eq sehr stark und sind abhängig von der jeweiligen CDR-Methode. Während für einige, aktuell eher teure CDR-Methoden erwartet wird, dass die Kosten durch Skaleneffekte sinken, wird für die Kosten der gegenwärtig eher günstigeren CDR-Methoden künftig ein Anstieg erwartet, bedingt durch Sättigungseffekte und eine Verknappung von Ressourcen.

Einleitung

Die [CO₂-Entfernung](#) (engl. Carbon Dioxide Removal, CDR) ist unverzichtbar, um die CO₂- oder [Treibhausgasemissionen auf Netto-Null](#) zu bringen (IPCC, 2022). CDR wird durch die Anwendung von [Negativemissionstechnologien](#) erzielt. Dabei handelt es sich um “menschliche Aktivitäten, die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten speichern” (IPCC, 2022). Welcher Speicherdauer “dauerhaft“ entspricht, wurde wissenschaftlich noch nicht ausreichend geklärt. Erste Arbeiten zeigen, dass die Speicherdauer bei mehr als 300 Jahren liegen muss (z.B. Matthews, 2010). CDR ist dabei kein Ersatz zur Emissionsreduktion, aber ein essenzieller Bestandteil einer Klimastrategie zur [Mitigation](#) (= Minderung) des menschengemachten Klimawandels (IPCC, 2022).

Um ihren Beitrag zur Erreichung der im Übereinkommen von Paris festgelegten Klimaziele zu leisten, will der Schweizer Bundesrat, dass die Schweiz bis 2050 eine Treibhausgasbilanz von Netto-Null erreicht. In seiner langfristigen Klimastrategie vom Januar 2021 hat er Leitlinien präsentiert, um dieses Netto-Null Ziel zu erreichen. Die Langfristige Klimastrategie zeigt gestützt auf den Energieperspektiven 2050+ (Kemmler et al., 2021a) auf, wie die Treibhausgasbilanz innerhalb der Schweiz bis 2050 Netto-Null erreichen kann. Gleiches sieht das Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (indirekter Gegenvorschlag zur Gletscher-Initiative) vor, welches am 30.9.2022 vom Schweizer Parlament verabschiedet wurde. Es definiert nebst Reduktionszielwerten während der Jahre 2030-2050 und dem Netto-Null-Zwischenziel im Jahr 2050 auch [netto-negative Treibhausgasemissionen](#) nach 2050, um einen Beitrag zu leisten, damit sich der Anstieg der globalen Mitteltemperatur nach einem möglichen Überschreiten von 1.5°C bis zum Ende des Jahrhunderts wieder auf unter 1.5°C reduziert. In welchem Umfang CDR eine Rolle in der Schweizer Klimapolitik spielen soll, ist von entscheidender Bedeutung, damit sich die Schweizer Politik, Industrie sowie Forschung und Gesellschaft entsprechend positionieren und heute die dafür notwendigen Rahmenbedingungen setzen können. Insbesondere auch, weil es mögliche Zielkonflikte bei der Nutzung limitierter Ressourcen wie Biomasse geben könnte. In einem Bericht zeigt der Schweizer Bundesrat, wie die [CO₂-Abscheidung und Speicherung](#) (CCS) und Negativemissionstechnologien schrittweise zum langfristigen Klimaziel der Schweiz beitragen können (Bundesrat, 2022). Dabei sieht der Bundesrat eine CO₂-Entfernung von ca. 7 MtCO₂/Jahr zum Ausgleich der schwer vermeidbaren Restemissionen im Jahr 2050 vor.

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) erstellt. Er beziffert im Umfang des Auftrags die Potenziale und Kosten für CDR-Methoden in der Schweiz auf der Basis von bestehender wissenschaftlicher Fachliteratur sowie Veröffentlichungen der Schweizer Bundesämter.

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz

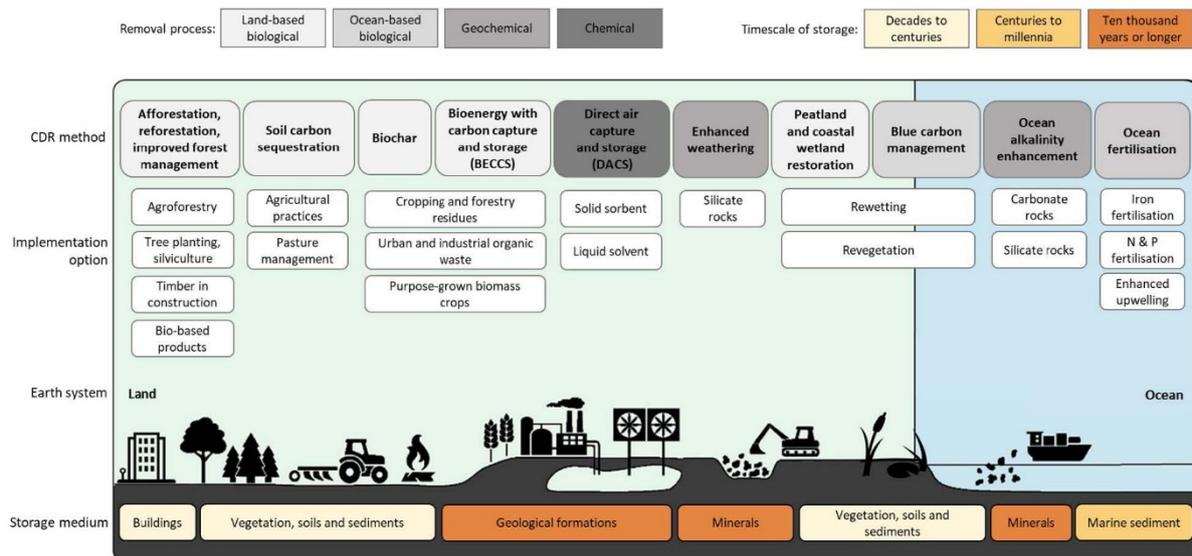


Abb. 1: CDR Taxonomie. Originalabbildung: IPCC (2022) basierend auf Minx et al. (2018).

Abbildung 1 zeigt eine gängige Klassifizierung verschiedener CDR-Methoden, auf welchem Entfernungsprozess sie basieren (landbasiert biologisch, ozeanbasiert biologisch, geochemisch oder chemisch) sowie wie lange das entfernte CO₂ gespeichert bleibt. Nicht alle Methoden können in der Schweiz angewendet werden, da beispielsweise ein Zugang zu einem Ozean fehlt. Die vorliegende Studie thematisiert die für die Schweiz relevanten CDR-Methoden Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierte Waldbewirtschaftung, Biomasseenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung, Bodenkohlenstoffsequestrierung, Einlagerung von Pflanzenkohle, beschleunigte Verwitterung sowie die direkte CO₂-Entfernung auf der Atmosphäre und Speicherung. Nachfolgend werden die verschiedenen CDR-Methoden kurz vorgestellt und ihre Potenziale und Kosten abgeschätzt. Bei einigen CDR-Methoden wird CO₂ stofflich abgetrennt und muss [sequestriert](#) (= gespeichert) werden. Die verschiedenen Speichermöglichkeiten, ihre Potenziale und Kosten sowie der CO₂-Transport werden im Anschluss an die CDR-Methoden aufgezeigt.

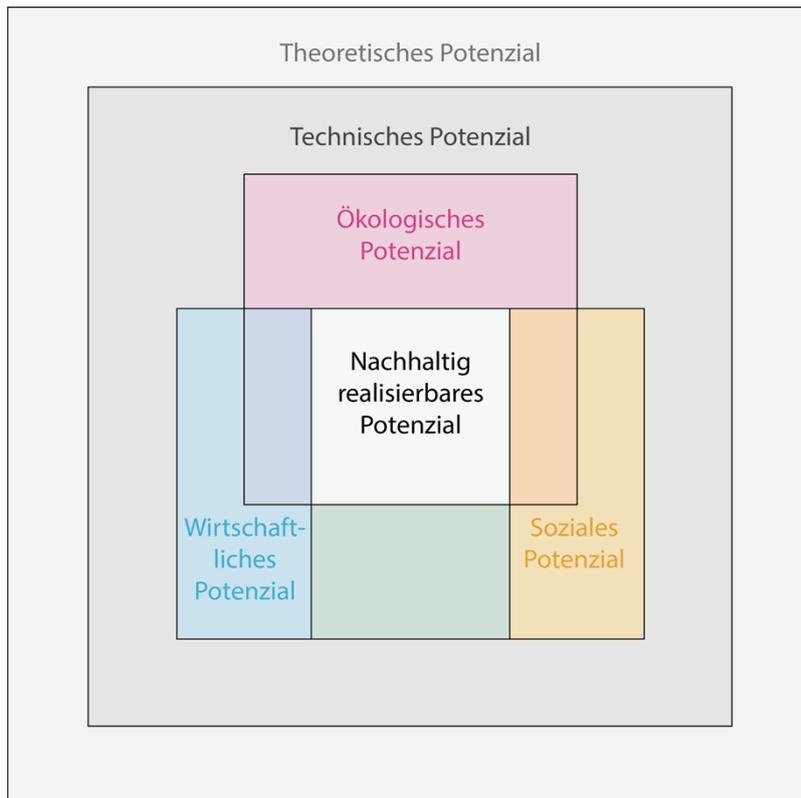


Abb. 2: Klassifizierung der verschiedenen Potenziale. Grafik basierend auf Bundesrat (2020).

Im Vordergrund dieser Studie steht das technische Potenzial, welches je nach CDR-Methode durch wirtschaftliche und ökologische Aspekte ergänzt wird. Das technische Potenzial beziffert, welche Menge "innerhalb der Grenzen der Physik und Chemie" sowie "nach heutigem Stand der Forschung" erzielt werden kann (Bundesrat, 2020). Für die tatsächliche Umsetzung relevant ist das nachhaltig realisierbare Potenzial (vgl. Abb. 2; Bundesrat, 2020), welches eine Teilmenge des technischen Potenzials bildet. Die bezifferten Potenziale beinhalten keine Treibhausgasemissionen, die während der Realisierung der Potenziale anfallenden würden. Auch geben sie keinen Aufschluss über eine indirekte Reduktion anderer Treibhausgasemissionen, beispielsweise hervorgerufen durch Substitutionseffekte.

Potenziale und Kosten von CDR-Methoden in der Schweiz

Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierte Waldbewirtschaftung

Durch die Photosynthese entfernt die Vegetation im Schweizer Wald sowie in der Flur CO₂ von der Atmosphäre und speichert es in der holzigen Biomasse. Die entfernte Menge kann durch Aufforstung, Wiederbewaldung sowie durch eine klimaoptimierte Waldbewirtschaftung erhöht werden. Solange die Vegetation intakt bleibt, oder genutzte holzige Biomasse nicht verbrannt oder anderweitig zersetzt wird, bleibt der CO₂-Speicher bestehen, in langlebigen Holzprodukten typischerweise über Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Bedingt durch die Dynamik des Kohlenstoffkreislaufs bzw. durch den reversiblen CO₂-Düngungseffekt ist nur jene CO₂-Aufnahme des Schweizer Waldes eine CDR-Methode, welche zusätzlich durch absichtliche menschliche Handlungen erfolgt (vgl. Definition von CDR in der Einleitung). So wäre beispielsweise die CO₂-Aufnahme eines unberührten Waldes aus naturwissenschaftlicher Sicht keine CDR-Methode. Im Falle einer Waldbewirtschaftung, wie es auch bei den meisten Wäldern in der Schweiz der Fall ist, ist nur die Differenz der realen CO₂-Aufnahme der bewirtschafteten Fläche zu einer Basislinie anrechenbar (IPCC, 2022). Die Basislinie beziffert dabei die CO₂-Aufnahme, die vorläge, wenn die bewirtschaftete Waldfläche unberührt geblieben wäre.

CDR-Potenzial

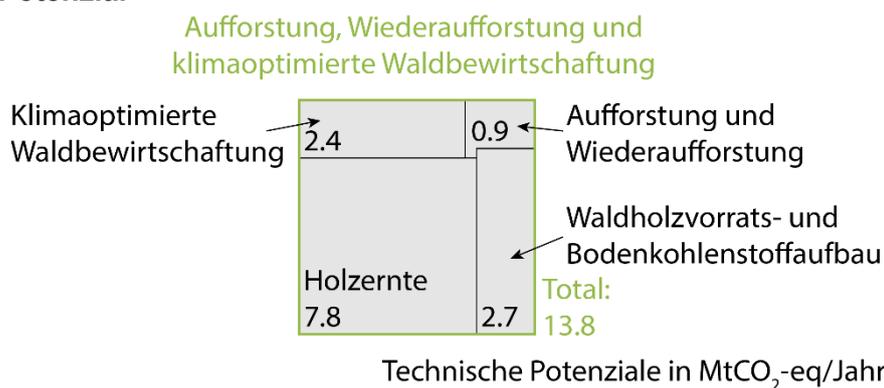


Abb. 3: Die geschätzten technischen Potenziale der Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierten Waldbewirtschaftung in MtCO₂-eq/Jahr.

Das technische CDR-Potenzial der Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierten Waldbewirtschaftung in der Schweiz wird auf 13.8 MtCO₂/Jahr geschätzt und setzt sich auf vier Teilpotenzialen zusammen (vgl. Abb. 3).

Bei der Aufforstung oder Wiederbewaldung in der Schweiz wird das technische CDR-Potenzial auf 0.87 MtCO₂/Jahr geschätzt (Austin et al 2020; Roe et al., 2021). Dies bedarf einer Landnutzungsänderung weg von Weide- und Ackerflächen sowie einer verdichteten Besiedlung und mit weniger versiegelten Flächen.

Für die Abschätzung der weiteren Teilpotenziale im Schweizer Wald fehlt bisher eine Basislinie, die beziffert, welche CO₂-Aufnahme der Schweizer Wald hätte, wenn er unberührt

geblieben wäre. In erster Näherung wird daher nur die reale CO₂-Aufnahme des Schweizer Walds in der vorliegenden Abschätzung berücksichtigt. Da nur die Differenz zwischen der realen CO₂-Aufnahme und der Baseline als CDR-Methode anrechenbar wäre, führt die vorliegende Näherung vermutlich zu einer Überschätzung des tatsächlichen technischen CDR-Potenzials.

Der Schweizer Wald entfernte in der Periode 2010-2019 im Mittel 12.9 MtCO₂-eq/Jahr (BAFU, 2021a). Gemäss Simulationen mit einem Waldentwicklungsmodell kann diese Menge durch eine klimaoptimierte Waldbewirtschaftung vorübergehend um 2.4 MtCO₂-eq/Jahr auf 15.3 MtCO₂-eq/Jahr gesteigert werden (Taverna et al., 2007). Nach Abzug der natürlichen Abgänge, der Ernte und des Abraums trägt der verbleibende Zuwachs zum Waldvorratsauf- oder abbau im Wald bei. Der Waldvorrat stellt dabei einen Kohlenstoffspeicher dar. Die liegengelassene Biomasse ist zudem ein Input beim Bodenkohlenstoffaufbau in Waldböden. In der Periode 2010-2019 lag die mittlere CO₂-Bilanz¹ aus CO₂-Verlust und CO₂-Aufnahme im Schweizer Wald bei 2.7 MtCO₂-eq/Jahr (BAFU, 2021a). Das technische Holzerntepotenzial in der Schweiz variiert je nach Waldbewirtschaftung und wird bei grosser Holznachfrage auf bis zu 8.5 Mio. m³ Derbholz geschätzt (Stadelmann et al., 2016), was ca. 7.8 MtCO₂-eq/Jahr entspricht². Durch eine ausgeprägte Kaskadennutzung, beispielsweise in der Gebäudekonstruktion, beim Gebäudeausbau, in Holzprodukten oder Papier/Karton kann das zuvor entfernte CO₂ während der stofflichen Holznutzung gespeichert bleiben. Im Anschluss an eine stoffliche Nutzung soll daher die holzige Biomasse als Rohstoff für die Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung sowie für die Einlagerung von Pflanzenkohle genutzt werden, damit das CO₂ auch über klimarelevante Zeiträume gespeichert bleibt.

Bedingt durch diverse Einflussfaktoren ist davon auszugehen, dass das realisierbare Potenzial der Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierten Waldbewirtschaftung aus folgenden Gründen tiefer liegt als das bezifferte technische Potenzial:

- Die oben besprochene Baseline fehlt bisher für den Schweizer Wald.
- Eine Landnutzungsänderung zugunsten zusätzlicher Waldflächen führt zu gesellschaftlichen Zielkonflikten.
- Die Holznutzung führt zu einer konstanten Abfuhr von Nährstoffen aus dem Wald. Durch das Zurücklassen des Schlagabraums bzw. der Ernterückstände im Wald wird der Nährstoffverlust reduziert, da die meisten Nährstoffe in den Ästen, im Laub und in der Rinde sind. Der Verlust wird jedoch nicht unterbunden. Ein Nährstoffdefizit kann sich nachteilig auf die Ökosysteme sowie den Zuwachs im Wald auswirken.
- Die Realisierung des Holznutzungspotenzials im gebirgigen Terrain ist aufwändig und entsprechend kostenintensiver als die Holznutzung im Flachland. Kurz- und mittelfristig fallen bei der Holzernte im gebirgigen Terrain auch mehr Treibhausgasemissionen als im Flachland an. Die anfallenden Treibhausgasemissionen wurden in der vorliegenden Studie nicht beziffert.

¹ "Die CO₂-Bilanz des Waldes setzt sich zusammen aus der CO₂-Aufnahme als Folge des Baumwachstums, aus Veränderungen des gespeicherten Kohlenstoffs in der Streu, im Boden und im Totholz abzüglich der Verluste als Folge der Waldnutzung und von natürlichen Abgängen (abgestorbene Bäume)" (BAFU, 2021b).

² Vereinfachte Annahme gestützt auf Taverna et al. (2007): 1 m³ Derbholz wiegt ca. 0.5 t, wovon 50% Kohlenstoff ist. Damit speichert 1 m³ Derbholz ca. 0.917 tCO₂.

- Energieholz sowie Abfallholz nach einer Kaskadennutzung müssten energetisch so genutzt werden, dass das in der holzigen Biomasse gespeicherte CO₂ in einer anderen Form dauerhaft gespeichert bleibt. Bei kleinen Feuerungen, wie Cheminées oder Pelletheizungen, ist dies technisch auf absehbare Zeit kaum möglich. Zur Umsetzung des maximalen Potenzials dürften folglich kleine Feuerungen nicht mehr betrieben werden. Bei mittleren Feuerungen, wie Heizkraftwerken, bietet die Herstellung und Einlagerung von Pflanzenkohle eine Möglichkeit, das durch die Biomasse aufgenommene CO₂ teilweise längerfristig zu speichern (vgl. unten). Dies hätte zur Folge, dass nur ein entsprechender Anteil der thermischen Energie genutzt werden könnte. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen kann daher geringer ausfallen als bei konventionellen Heizkraftwerken. Grössere Anlagen müssten konsequent mit CCS betrieben werden (vgl. BECCS unten).
- Der Einfluss des Klimawandels auf den Vegetationsbestand ist unsicher. Durch anhaltende Trockenheit, Brände oder häufiger werdende Extremereignisse könnte der Holzvorrat im Wald dezimiert werden.

Kosten

Die Kosten der Aufforstung oder Wiederbewaldung werden global auf 0-240 CHF/tCO₂-eq geschätzt (Smith et al., 2016; Fuss et al., 2018). Die geschätzten Holzerntekosten in der Schweiz variieren je nach Holznutzung, geografischer Lage und Zeitperiode. Für die Periode 2027-2056 wird geschätzt, dass 4.3 Mio. m³ Derbholz pro Jahr (3.9 MtCO₂-eq/Jahr) für unter 87 CHF/tCO₂-eq, 3.4 Mio. m³ Derbholz pro Jahr (3.1 MtCO₂-eq/Jahr) für 87 bis 164 CHF/tCO₂-eq und 1.4 Mio. m³ Derbholz pro Jahr (1.3 MtCO₂-eq/Jahr) für über 164 CHF/tCO₂-eq geerntet werden könnten (Stadelmann et al., 2016). Durch das Waldmanagement fallen noch zusätzliche Kosten an.

Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung

Bei der Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS) wird holzige und nicht-holzige Biomasse energetisch genutzt, wobei CO₂ aus den entstehenden Abgasen mittels CCS abgeschieden und gespeichert wird. Zu den Beispielen für BECCS zählt die Verbrennung von pflanzlichen Abfällen in Kehrrichtverwertungsanlagen mit CCS, die Aufbereitung von Biogas mit anschliessender Speicherung des abgetrennten CO₂, die Verbrennung von Biogas oder nicht-fossilen Brennstoffen in Gaskraftwerken mit CCS oder die Verbrennung von Altholz in Zementwerken mit CCS.

CDR-Potenzial

Das Potenzial von BECCS in der Schweiz hängt primär vom Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung sowie von geeigneten Speichermöglichkeiten für das abgeschiedene CO₂ ab. Thees et al. (2017) schätzte das nachhaltig realisierbare Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung in der Schweiz auf 97 PJ pro Jahr. In der Studie wurden auch wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt. Bei der Verbrennung dieser Biomasse würden 12.0 MtCO₂/Jahr frei werden, wovon 49% von holziger Biomasse stammen würden (Details zur Berechnung vgl. Anhang A1). Mit Anlagen zur (post-combustion) CO₂-Abscheidung lassen sich typischerweise 90% und mehr erzielen, wobei die Kosten mit zunehmender CO₂-Abscheidungsrate steigen (Brandl et al., 2021). Somit läge das technische Potenzial von BECCS bei 10.8 MtCO₂/Jahr, wovon 5.3 MtCO₂/Jahr von holziger Biomasse stammen würden.

Um das gesamte CDR-Potenzial von BECCS zu realisieren, müsste sämtliche energetisch genutzte Biomasse so verbrannt werden, dass das bei der Verbrennung entstehende CO₂ abgeschieden und langfristig gespeichert bleibt. Dies würde eine energetische Nutzung von Biomasse wie Holz oder Biogas in kleineren Anlagen, wie jene in Haushalten oder in Fahrzeugen, vermutlich ausschliessen. Das realisierbare Potenzial reduziert sich, falls kleinere Anlagen ohne CCS und nur grössere Anlagen als BECCS betrieben würden: Rosa et al. (2021) schätzte das technische Potenzial für BECCS durch eine Nachrüstung von CCS von bestehenden Zellstoff- und Papierfabriken, Abwasserreinigungsanlagen, Anlagen mit einer Zufeuerung von Biomasse sowie Kehrlichtverwertungsanlagen in der Schweiz auf 2.0 MtCO₂/Jahr. Berücksichtigt wurden Anlagen, welche mindestens 0.1 MtCO₂ im Jahr 2018 emittierten. Die Schweizer Kehrlichtverwertungsanlagen verzeichneten einen anhaltenden Trend, stetig mehr Biomasse zu verbrennen: In den Jahren 2010 respektive 2019 wurden 31% und 50% mehr Biomasse verbrannt als im Jahr 2000 (jeweils bezogen auf den Heizwert; BAFU 2021a). Im Jahr 2019 führte die Verbrennung von Biomasse in Schweizer Kehrlichtverwertungsanlagen zu CO₂-Emissionen von 2.3 MtCO₂/Jahr (BAFU 2021a). Eine umfassende Anwendung von CCS bei Schweizer Kehrlichtverwertungsanlagen würde damit nicht nur zu CDR führen, sondern auch die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Abfälle stark reduzieren, welche im Jahr 2019 2.1 MtCO₂/Jahr betragen (BAFU 2021a). Technisch wäre für alle Anlagen eine Anwendung von CCS möglich, falls genügend Platz, eine geeignete Wärmequelle und eine Möglichkeit zum Transport oder zur Speicherung des abgeschiedenen CO₂ vorhanden sind. Wie oben durch Rosa et al. (2021) dargelegt, wird die Wirtschaftlichkeit bei kleineren Anlagen jedoch herausfordernder. Auch bei Schweizer Zementwerken könnte CCS einerseits die fossilen bzw. geogenen CO₂-Emissionen stark verringern und andererseits durch die Verwendung von Biomasse als Brennstoff zu CDR führen. Der Verband der Schweizerischen Zementindustrie stellt in Aussicht, dass Schweizer Zementwerke mit BECCS zu CDR im Umfang von 0.3 MtCO₂/Jahr im Jahr 2050 führen würden (Cemsuisse, 2021). Allgemein gilt bei BECCS, dass die geologische Speicherung von CO₂ innerhalb der Schweiz noch unzureichend geklärt ist (vgl. unten).

Kosten

Die Kosten für BECCS variieren je nach Anlagentyp der Bioenergienutzung. Für Schweizer Kehrlichtverwertungsanlagen mit CCS werden die anfänglichen Kosten auf 156-190 CHF/tCO₂ geschätzt (inkl. Transport und Speicherung). Dabei kostet die Abscheidung und Verdichtung von CO₂ exkl. Transport und Speicherung in der ersten Umsetzung schätzungsweise 45-51 CHF/tCO₂ und künftig 32-46 CHF/tCO₂ (Eckle et al., 2021). Künftig ist davon auszugehen, dass es bei Biomasse zu einer Verknappung der Ressource kommen wird, was zu einer Steigerung der Kosten führen kann.

Einlagerung von Pflanzenkohle

Pflanzenkohle (Biochar) entsteht durch die Pyrolyse von pflanzlicher Biomasse. Die Pyrolyse findet zwischen 450-750°C in einer sauerstoffarmen Umgebung statt, wobei ca. 20-50% des CO₂, welches die Biomasse zuvor aus der Atmosphäre entfernte, über Jahrhunderte bis mehrere Jahrtausende gespeichert bleibt (z.B. Schmidt et al., 2021). Die Pflanzenkohle kann in Böden oder Baumaterialien eingebracht werden, wo der enthaltene Kohlenstoff nur langsam abgebaut wird. Eine Pyrolyseanlage kann Wärme und, je nach Anlage, auch Strom bereitstellen. Die Energieausbeute ist jedoch geringer, als wenn die pflanzliche Biomasse

vollständig verbrannt würde. Eine höhere Pyrolysetemperatur führt allgemein zu einem stabileren Kohlenstoffspeicher. Dabei sinkt das CDR-Potenzial, da ein kleinerer Teil des anfänglichen Kohlenstoffs der Biomasse in der Pflanzenkohle verbleibt (Lehmann et al., 2021). Korrekt abgestimmte Prozessparameter und eine selektive Auswahl der Biomasse vermeiden bei der Herstellung der Pflanzenkohle eine mögliche Schadstoffbelastung der Pflanzenkohle.

CDR-Potenzial

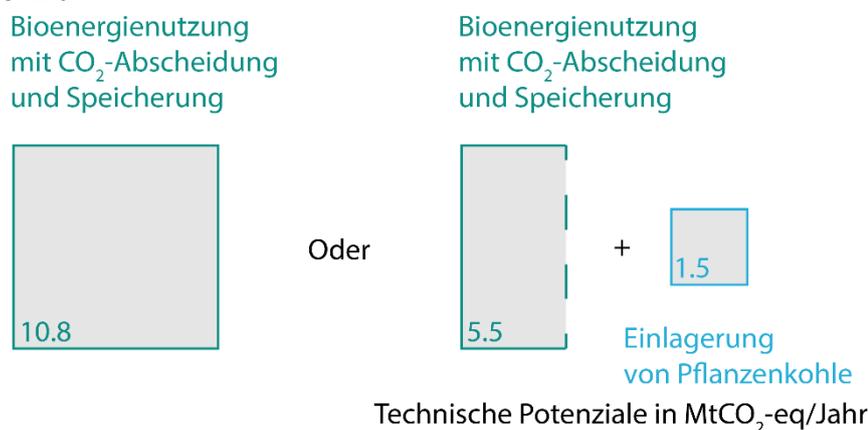


Abb. 4: BECCS und die Herstellung von Pflanzenkohle konkurrieren um die gleiche Biomasse als Rohstoff. Technische Potenziale in MtCO₂-eq/Jahr.

Als Rohstoff zur Herstellung von Pflanzenkohle kann teilweise die gleiche Biomasse wie für BECCS genutzt werden (vgl. Abb. 4). Schmidt et al. (2021) schätzt basierend auf dem Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung in der Schweiz von Thees et al. (2017) ein technisches CDR-Potenzial von 1.5 MtCO₂-eq/Jahr zur Herstellung und Einlagerung von Pflanzenkohle in Böden ab, wodurch 49% der nachhaltig verfügbaren Biomasse genutzt würde. Würde die verbleibende Biomasse für BECCS genutzt, ergäbe sich für BECCS ein CDR-Potenzial von 5.5 MtCO₂/Jahr.

Pyrolyseanlagen sind typischerweise kleiner als Anlagen mit CCS. Dadurch eignen sich Pyrolyseanlagen beispielsweise als Ersatz von bestehenden konventionellen Holzheizkraftwerken. Als mögliches Hindernis gestaltet sich der kleinere Wirkungsgrad, und der in der Folge erhöhte Brennstoffbedarf im Vergleich zu bestehenden Holzheizkraftwerken, da bewusst eine unvollständige Verbrennung des Brennstoffs beabsichtigt wird. Bei kleinen Feuerungen, wie Cheminées oder Pelletheizungen, fehlen bisher entsprechende Pyrolyseanlagen. Bleiben diese aus, kann das maximale Potenzial nicht erreicht werden.

Kosten

Die Kosten für die Einlagerung von Pflanzenkohle (inkl. Herstellung der Pflanzenkohle) werden global auf 9-320 CHF/tCO₂-eq geschätzt (10-345 USD/tCO₂-eq; IPCC, 2022). Die Kostenschätzungen beziehen sich oft auf holziger Biomasse als Ausgangsmaterial. Da die Verfügbarkeit von holziger Biomasse als Ausgangsmaterial in der Schweiz begrenzter ist als in anderen Staaten, kann davon ausgegangen werden, dass die untere Kostengrenze unrealistisch für die Einlagerung von Pflanzenkohle in der Schweiz sein dürfte.

Bodenkohlenstoffsequestrierung

Bei der Bodenkohlenstoffsequestrierung (engl. Soil carbon sequestration, SCS) wird durch Änderungen der Landbewirtschaftungspraktiken im Boden ein neues, höheres Bodenkohlenstoffgleichgewicht eingestellt, wobei der vorübergehende Bodenkohlenstoffaufbau zu einer Nettoentfernung von CO₂ aus der Atmosphäre führt. Dabei wird der Eintrag von organischem Kohlenstoff erhöht und der Abbau reduziert wird. Dies kann beispielsweise durch eine Änderung der Fruchtfolge, Zwischenfrüchte, Tiefpflügen, etc. erreicht werden. Darüber hinaus geht die bereits erfolgte Sequestrierung potenziell verloren, sobald die Bewirtschaftungspraktiken aufgegeben werden. SCS ist also nur dann dauerhaft, wenn die Bewirtschaftungspraktiken auf unbestimmte Zeit beibehalten werden. Durch das Postulat Bourgeois ([19.3639](#)) ist derzeit ein Bericht zur Kohlenstoffsequestrierung in Böden in der Ausarbeitung.

CDR-Potenzial

Allgemein gibt es bei den Schätzungen zum CDR-Potenzial von SCS grosse Unsicherheiten und die entfernte Menge an CO₂ nimmt mit der Zeit ab, weil die Differenz zum neuen Gleichgewichtszustand immer kleiner wird. Lee et al. (2020) beziffert je nach Massnahme, dass der Bodenkohlenstoff jährlich um 0.4-1.8 tCO₂-eq/ha aufgebaut werden könnte, was für alle Ackerflächen in der Schweiz³ einem technischen CDR-Potenzial von 0.17 - 0.77 MtCO₂/Jahr für SCS bis zum Erreichen des neuen Bodenkohlenstoffgleichgewichts entsprechen würde. Allerdings wurde diese Studie für zu hohe Verluste in der Baseline kritisiert, wodurch das Potential vermutlich zu hoch angesetzt ist (Nesme et al., 2020). Guillaume et al. (2022) schätzte für den Kanton Fribourg ab, dass bei Ackerböden mit einem höheren Anteil an temporärem Grasland in der Fruchtfolge zusätzlicher Bodenkohlenstoff von 0.85 MtC aufgebaut werden kann. Dabei könnte es mehr als ein Jahrhundert dauern, bis dieses neue Gleichgewicht erreicht wird, wobei die grössten Bodenkohlenstoffaufbauzeiten zu Beginn stattfinden (Poepplau et al., 2011; Smith, 2014). Basierend auf globalen Modellen wird das technische Potenzial von SCS auf Schweizer Dauergrünlandböden auf 0.65 MtCO₂-eq/Jahr geschätzt (Soils Revealed, 2020; Roe et al., 2021).

Kosten

Die Kosten für SCS werden global auf -42 bis 93 CHF/tCO₂-eq geschätzt (-45 bis 100 USD/tCO₂-eq; Smith et al., 2016; Fuss et al., 2018; NASEM, 2019).

Beschleunigte Verwitterung von Silikatgesteinen

Calcium- und magnesiumreiches Silikatgestein verwittert und bindet dabei CO₂. Bei der beschleunigten Verwitterung von Silikatgesteinen (engl. Enhanced Silicate Rock Weathering, ERW) wird dieser natürlich sehr langsam stattfindende Prozess beschleunigt, beispielsweise indem das Gestein zerkleinert, dadurch die Oberfläche vergrössert und anschliessend auf Böden ausgebracht wird.

CDR-Potenzial

Das CDR-Potenzial von ERW hängt von einigen Grössen ab, wie beispielsweise von der Bodenbeschaffenheit (z.B. pH), von der biologischen Aktivität (Pilze, Bakterien, Fauna, Flora), von der Gesteinsart und -partikelgrösse, von der Applikationsrate sowie von

klimatischen Bedingungen (z.B. Temperatur und Feuchte). Beerling et al. (2020) schätzte das technische CDR-Potenzial für Ackerflächen in Deutschland, Frankreich und Italien im Mittel auf umgerechnet 6.1 tCO₂/ha pro Jahr (4.1 bzw. 8.0 tCO₂/ha pro Jahr für eine langsame respektive schnelle Verwitterung). Für die Schweizer Ackerflächen würde dies einem technischen CDR-Potenzial von 2.3 MtCO₂/Jahr entsprechen³ (1.6 bzw. 3.1 MtCO₂/Jahr für eine langsame respektive schnelle Verwitterung). Nebst Ackerflächen kann ERW auch auf Weiden, Wiesen (z.B. Groll et al., 2021; Hagens et al., 2021) und im Wald (z.B. Taylor et al., 2021) angewendet werden, welche das technische CDR-Potenzial von ERW schätzungsweise auf weitere ca. 10 MtCO₂/Jahr erhöht. Zur genaueren Bestimmung des technischen CDR-Potenzials von ERW bedarf es Feldversuchen sowie spezifischen Simulationen mit einem Landoberflächenmodell. Es ist noch nicht abschliessend geklärt, ob geeignete Gesteine für ERW in der Schweiz vorkommen.

Kosten

Beerling et al. (2020) schätzt global die Kosten von ERW bei Ackerflächen auf 80-180 USD/tCO₂ (74-166 CHF/tCO₂ inkl. Transport des Gesteins aus dem Ausland).

Direkte CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre und Speicherung

Direct Air Capture and Storage (DACs) ist eine CDR-Methode zur Entfernung von CO₂ direkt aus der Atmosphäre mit eigens dafür konzipierten Prozessen und der anschliessenden dauerhaften Speicherung des CO₂.

CDR-Potenzial

Das technische CDR-Potenzial von DACs ist primär von drei externen Faktoren begrenzt (McQueen et al., 2021; Erans et al., 2022): (1) das ungenutzte oder überschüssige Potenzial für elektrische Energie, (2) das ungenutzte oder überschüssige Potenzial für thermische Energie sowie dessen Temperaturniveau und (3), die Möglichkeiten zur Speicherung des entfernten CO₂. Je nach DAC-Prozess werden unterschiedliche Anforderungen an die benötigte elektrische und thermische Energie gestellt (z.B. Erans et al., 2022). So sind beispielsweise elektrochemische DAC-Prozesse nur vom ersten und dritten Faktor abhängig und benötigen keine thermische Energie. Wohland et al. (2018) schätzte das technische CDR-Potenzial von DAC betrieben mit erneuerbarem Überschussstrom in Europa auf 500 MtCO₂/Jahr. Den Autoren ist keine Studie bekannt, welche ein Potenzial für DACs spezifisch in der Schweiz beziffert. Periodisch kann in der Schweiz überschüssige elektrische (z.B. Kemmler et al., 2021a) und thermische Energie vorhanden sein, wobei die Realisierung des bisher ungenutzten Potenzials für erneuerbare Energien und Wärmequellen stockt. Es gibt jedoch eine Reihe von gesellschaftlichen Zielen und Anwendungen, für welche überschüssige oder neu erschlossene Energie genutzt werden könnte, beispielsweise zur Emissionsreduktion bei anderen Anwendungen, für den internationalen Stromhandel oder für die saisonale Speicherung mittels synthetischer Brenn- und Treibstoffe. Es ist offen, ob und welcher Anteil der Schweizer Energie für DACs genutzt werden würde. Dazu sind gegenwärtig Forschungsarbeiten im Gange (z.B. SWEET DeCarbCH WP12.4). Die Erschliessung von möglichen geologischen Reservoirs im Inland

³ Flächen in der Schweiz (BFS, 2021): Ackerflächen 388'383 ha; Naturwiesen und Heimweiden 512'788 ha jeweils in der Periode 2013-2018. Waldflächen: 730'960 ha in den LFI-Wirtschaftsregionen 1,2,3,4,5,6,7,8 und 14, jeweils exkl. Reservatsflächen (LFI, 2015; Thees et al., 2017, S. 42 & 45). Ackerfläche Kt. Fribourg 75'657 ha (Guillaume et al., 2022).

würde wahrscheinlich Jahrzehnte in Anspruch nehmen (siehe unten), und die Energiekosten wären teilweise deutlich höher als im Ausland, wo sich ggf. auch geeignete Speichermöglichkeiten befinden.

Kosten

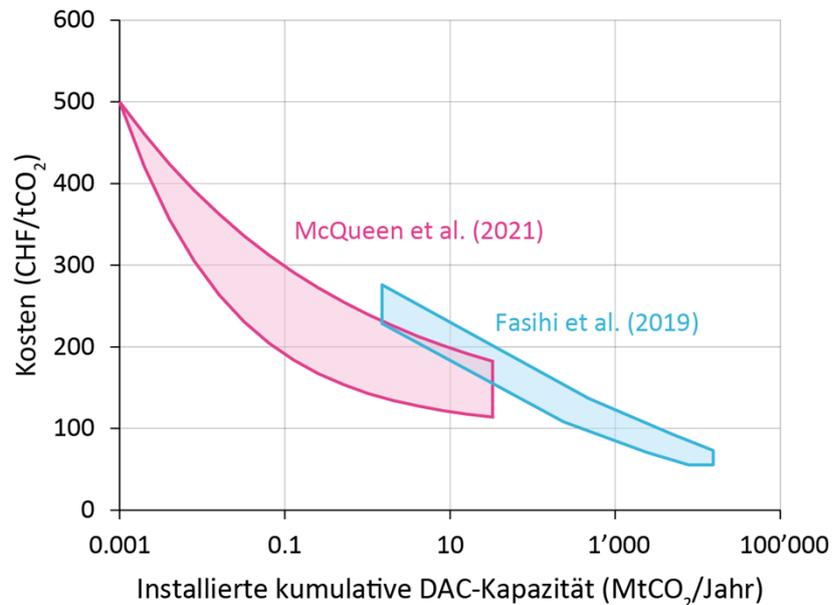


Abb. 5: Die von Fasihi et al. (2019) und McQueen et al. (2021) geschätzte DAC-Kostenentwicklung im Bezug zur global kumulativ installierten DAC-Kapazität.

Mit 28-926 CHF/tCO₂ (30-1000 USD/tCO₂) variieren die globalen Kostenschätzungen für DAC sehr stark in der wissenschaftlichen Literatur (z.B. Keith et al., 2018; Krekel et al., 2018; Fasihi et al., 2019; NASEM, 2019; Voskian and Hatton, 2019; McQueen et al., 2021; Kahsar et al., 2022). Einflussgrößen sind die verwendeten DAC-Prozesse, Standort, Herkunft der elektrischen und thermischen Energie sowie Skaleneffekte. Meist wird erwartet, dass sich die Kosten mit zunehmender Skalierung reduzieren (vgl. Abb. 5): z.B. McQueen et al. (2021) rechnet mit einer Lernrate von 10-20% und Fasihi et al. (2019) mit 10-15%, was einer Kostenspanne von 120-230 CHF/tCO₂ bei einem globalen Massstab von ca. 10 MtCO₂/Jahr entspricht (exkl. Speicherung und Transport).

Potenziale und Kosten zur Speicherung und zum Transport von CO₂

Geologische CO₂-Speicherung

Zur geologischen Speicherung von abgeschiedenem CO₂ eignen sich tiefe, saline Aquifer und Sedimentbecken, ausgediente Erdöl-, Erdgas- oder CO₂-Felder oder reaktive Gesteinsschichten. Die geologische Speicherung in reaktiven Gesteinsschichten führt zu einer permanenten, bei den anderen geologischen Speichermethoden zu einer nahezu permanenten Speicherung des CO₂.

Potenzial

Das theoretische Potenzial zur geologischen Speicherung von CO₂ in der Schweiz ist aktuell noch unzureichend geklärt. Chevalier et al. (2010) schätzte erstmals grob das theoretische, effektive Potenzial in über 800 m tiefen salinen Aquifer auf 2'680 MtCO₂. Die Aquifer im Muschelkalk trugen 708 MtCO₂ zum Gesamtpotenzial bei. Aufgrund der Verfügbarkeit neuer Daten wird das theoretische Potenzial im Muschelkalk gegenwärtig auf 52 MtCO₂ geschätzt (Diamond, 2019; Giardini et al., 2021). Die Verringerung des geschätzten Potenzials im Muschelkalk lässt jedoch keine Schlüsse auf eine Veränderung der Potenziale der restlichen salinen Aquifer zu. Auch die aktuellen Abschätzungen sind noch sehr unsicher, sollen aber in den kommenden Jahren basierend auf der Motion [20.4063](#) genauer abgeklärt werden. In Europa wird das technische Potenzial zur geologischen Speicherung von CO₂ in Aquifer und Sedimentbecken auf 232'000-2'120'000 MtCO₂ geschätzt (Consoli and Wildgust, 2017; Kearns et al., 2017). Zum Vergleich wird global davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 CDR im Umfang von 6'400 MtCO₂ /Jahr betrieben wird (Median der Szenariokategorie C1; IPCC, 2022). Das Potenzial in reaktiven Gesteinsschichten dürfte noch grösser sein, da alleine für Island ein technisches Potenzial von 60'000-7'000'000 MtCO₂ abgeschätzt wird (Snæbjörnsdóttir and Gislason, 2016). Weitere geeignete Gesteinsschichten mit reaktiven Bedingungen nahe der Schweiz werden in Norwegen, der Türkei, Bosnien und Herzegowina, Kroatien, Griechenland, Italien, Spanien sowie Deutschland vermutet (Pilorgé et al., 2021, sowie die darin enthaltenen Quellen).

Kosten

Die Kosten für die Speicherung in salinen Aquifer werden auf 6-19 CHF/tCO₂ (7-20 USD/tCO₂; DOE, 2014; NASEM, 2019) und in reaktiven Gesteinsschichten auf 2-23 CHF/tCO₂ (2-25 USD/tCO₂) geschätzt (Gunnarsson et al., 2018; Carbfix, 2021).

Speicherung von CO₂ in Recyclingbeton

Recyclingbeton kann mit CO₂ in Kontakt gebracht werden, wodurch im Beton eine CO₂-Mineralisierung stattfindet, die CO₂ chemisch in Form von Carbonaten bindet. Die CO₂-Mineralisierung ist eine permanente Speichermethode.

Potenzial

Das technische Potenzial zur Speicherung von CO₂ in Recyclingbeton in der Schweiz wird auf 0.56 MtCO₂/Jahr im Jahr 2050 geschätzt (Tiefenthaler et al., 2021).

Kosten

Den Autoren sind keine Kostenschätzungen in der wissenschaftlichen Literatur zur Speicherung von CO₂ in Recyclingbeton bekannt⁴. Ein Schweizer Anbieter dieser Speichermethode schätzt die Kosten auf 200-700 USD/tCO₂, wobei diese Kosten auch die Abscheidung, die Verflüssigung und den Transport von CO₂ aus Biogas beinhalten (Stripe, 2021).

Transport von CO₂

Meist bedarf es eines Transports von CO₂ vom Ort der Entfernung, bzw. der Abscheidung zum Speicherort. Eckle et al. (2021) untersuchte, wie sich der Transport von CO₂ zur geologischen Speicherung nach Norwegen gestalten könnte. Dabei werden verschiedene Mittel vorgeschlagen, je nachdem, wie viel CO₂ jährlich gespeichert werden soll (Eckle et al., 2021): Bei Mengen von bis zu 100'000 tCO₂/Jahr wird vorgeschlagen, dass das CO₂ mit einer Kombination aus Lastwagen, einer kurzen Pipeline und Zug bis nach Rotterdam befördert wird, wo es anschliessend mit dem Schiff bis zum CO₂-Hub des [Northern Lights](#)-Projekts gebracht wird. Die Kosten für den Transport ohne Zwischenspeicherung werden auf 78 CHF/tCO₂ geschätzt. Bei mittleren oder grossen zu transportierenden Mengen an CO₂ wird ein Transport via Pipeline vorgeschlagen. Die Kosten für den Transport inklusive der Verdichtung des CO₂ werden dafür auf 23-29 CHF/tCO₂ geschätzt (Eckle et al., 2021). Eine weitere Studie von Maggiore et al. (2021) untersuchte ein Sammel- und Transportnetzwerk für CO₂ aus 32 Punktquellen in der Schweiz. Die Anfangsinvestitionen werden auf 2.8-3.2 Mia. CHF geschätzt und die Betriebskosten belaufen sich auf ca. 210 Mio. CHF pro Jahr, was in der Kombination ca. 36 CHF/tCO₂ für den Transport von den Punktquellen bis zur Schweizer Grenze entsprechen würde (Maggiore et al., 2021). Die Studie vom Eckle et al. schätzte hierfür 8.20 CHF/tCO₂ ab.

Analog zum Transport nach Norwegen bietet sich ein Transport zu Speicherstätten in Island an. Diese Transportkette soll während des Pilotprojekts [DemoUpCARMA](#) quantifiziert und demonstriert werden.

⁴ Kostenschätzungen existieren zur Carbonatisierung von Beton während oder vor der Verwendung im Bauteil (z.B. Strunge et al., 2022; Wang et al., 2022), wobei dabei in den Beton auch Schlacke oder Silikatgesteine eingearbeitet werden, welche das CO₂-Aufnahmevermögen des Betons verändern. Dadurch, sowie durch den Umstand, dass frischer Beton mehr CO₂ aufnehmen kann als Jahrzehnte alter Beton, sind die Kostenschätzungen nicht mit der Kostenschätzung zur Speicherung von CO₂ in Recyclingbeton vergleichbar.

Diskussion und Schlussfolgerung

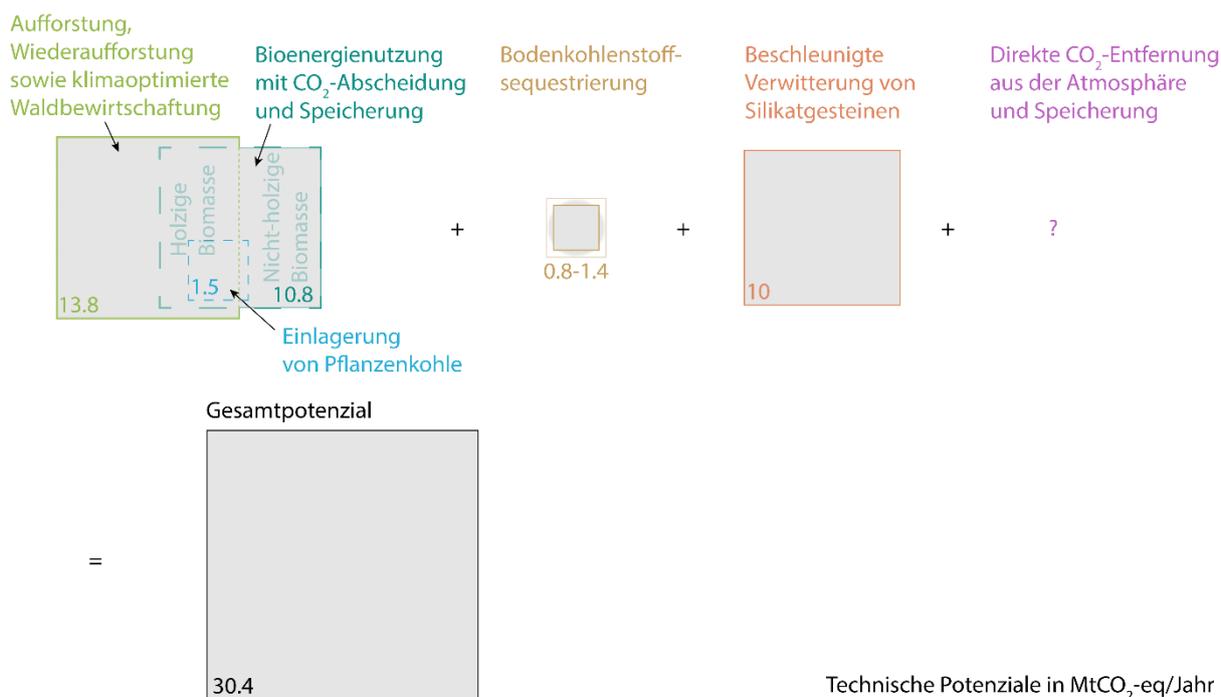


Abb. 6: Die geschätzten technischen Potenziale der berücksichtigten CDR-Methoden sowie das technische Gesamtpotenzial in MtCO₂-eq/Jahr.

Das technische Gesamtpotenzial für CDR in der Schweiz ohne DACS wird auf 30 MtCO₂-eq/Jahr geschätzt (vgl. Abb. 6 und Tab. 1). Da die gleiche Biomasse bei der Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierten Waldbewirtschaftung, bei BECCS und bei der Herstellung von Pflanzenkohle als Speichermedium bzw. als Rohstoff eingesetzt werden kann, aber nur einmal CO₂ entfernt hat, fällt das technische Gesamtpotenzial kleiner aus als die Summe der technischen Potenziale aller CDR-Methoden. Während die technischen Potenziale für BECCS und für die Einlagerung von Pflanzenkohle relativ robust sind, gibt es bei der Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierten Waldbewirtschaftung, bei SCS sowie bei ERW noch grössere Unsicherheiten. Eine Bezifferung der Unsicherheiten ist nur für einige Komponenten möglich und bildet einzig die in verschiedenen Studien publizierten Resultate ab. Ebenso ist das Potenzial für die geologische Speicherung in der Schweiz noch unzureichend geklärt. Für DACS wurde keine Potenzialabschätzung spezifisch für die Schweiz in wissenschaftlichen Veröffentlichungen gefunden.

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz

Tab. 1: Geschätzte technische Potenziale der berücksichtigten CDR-Methoden in der Schweiz, Vergleich mit früheren Studien (Beuttler et al., 2017; Kemmler et al., 2021b) und der im Szenario «ZERO Basis» der Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) genutzten Menge an CDR im Jahr 2050 (Kemmler et al., 2021b) sowie geschätzte Kosten. Die isoliert betrachteten Potenziale nutzen teilweise die gleiche Biomasse als Rohstoff, wodurch das kombinierte Potenzial kleiner ausfällt.

* Keine Werte zur Zusammensetzung des kombinierten Potenzials veröffentlicht.

** Keine Werte veröffentlicht.

*** Entspricht der eingesparten Menge an CO₂, nicht der entfernten Menge CO₂.

	Diese Studie		Beuttler et al., (2018)		EP2050+ Kemmler et al., (2021b)		Diese Studie Kosten (CHF/tCO ₂ -eq)
	Technisches Potenzial, isoliert betrachtet (MtCO ₂ -eq/Jahr)	Technisches Potenzial, kombiniert (MtCO ₂ -eq/Jahr)	Theoretisches Potenzial isoliert (MtCO ₂ -eq/Jahr)	Theoretisches Potenzial, kombiniert (MtCO ₂ -eq/Jahr)	Potenzial (MtCO ₂ -eq/Jahr)	genutzt im Szenario "ZERO Basis" (MtCO ₂ -eq/Jahr)	
Aufforstung, Wiederaufforstung und klimaoptimierte Waldbewirtschaftung	13.8	13.8	3.1	*	2	0	0 - 240
Bioenergienutzung mit CO ₂ -Abscheidung und Speicherung (BECCS)	10.8	5.5	5.1	*	**	2.04	156 -190
Davon aus holziger Biomasse	5.3	0					
Davon aus nicht-holziger Biomasse	5.5	5.5					
Einlagerung von Pflanzenkohle	1.5	0.0	2.2	*	2.5***	0.01	9 - 320
Bodenkohlenstoffsequestrierung (SCS)	0.8 - 1.4	1.1	3.6	*	**	0	-42 - 93
Beschleunigte Verwitterung von Silikatgesteinen (ERW)	10.0	10.0			**	0	80 - 180
Direkte CO ₂ -Entfernung auf der Atmosphäre und Speicherung (DACs)	?	?				0	28 - 926
Total		30.4		6			-42 - 926

Offen ist, welcher Teil des technischen Potenzials nachhaltig realisiert werden kann.

Aufgrund folgender Aspekte wird die realisierbare Menge an CDR gegenüber dem oben ausgewiesenen technischen Potential geringer ausfallen:

- Die Umsetzung des genannten Potenzials setzt teilweise grosse Verhaltensänderungen voraus, beispielsweise in der Landnutzung oder wie Biomasse stofflich und energetisch innerhalb der Gesellschaft und Industrie genutzt wird. Bleiben diese Änderungen aus, reduziert sich der realisierbare Betrag an CDR massgeblich.
- Die Biomasse für BECCS und Pflanzenkohle kann auch für andere Zwecke ohne CDR eingesetzt werden, beispielsweise als Ersatz fossiler Rohstoffe bzw. Energieträger. Auch kann abgeschiedenes CO₂ zur Herstellung von zuvor Erdöl-basierten Rohstoffen dienen, wie beispielsweise Kunststoffen, synthetischen Brenn- und Treibstoffen oder Medikamenten. Dies würde zu einer entsprechenden Reduktion der realisierten Menge an CDR führen.
- Offen ist auch, in welchem Umfang die Schweizer Bevölkerung und Wirtschaft bereit ist, die Kosten für CDR zu tragen. In den meisten Fällen wird eine Reduktion des Treibhausgasausstosses die günstigere und technisch einfachere Massnahme sein als ein Ausgleich der Treibhausgasemissionen mit CDR.

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz

- Die bezifferten Potenziale beinhalten noch keine allfälligen Treibhausgasemissionen, welche durch die Anwendung der jeweiligen CDR-Methode entstehen. Dadurch wird sich der realisierte Nettobetrag an CDR verringern. Erst eine Analyse der Lebenszyklusemissionen kann abschätzen, wie gross die Reduktion sein dürfte.
- CDR umfasst, wie bereits vermerkt, "menschliche Aktivitäten, die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten speichern" (IPCC, 2022). Dabei wurde wissenschaftlich noch nicht festgelegt, welcher Speicherdauer "dauerhaft" entspricht. Sobald dies definiert wird, entfallen die Potenziale von CDR-Methoden mit einer kürzeren Speicherdauer. Diese können immer noch dazu beitragen, CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen, müssten dann allerdings den nicht dauerhaften Teil wiederholt entfernen und speichern.

Erste grobe Abschätzungen deuten darauf hin, dass das ökologische CDR-Potenzial etwa halb so gross wie das technische sein dürfte und somit auch grösser wäre als bisher angenommen. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung führt CDR in der Schweiz nicht nur zu Kosten, sondern eröffnet auch die Möglichkeit, an neuen, lukrativen globalen Wirtschaftszweigen teilzunehmen sowie die Kosten durch die Auswirkungen des Klimawandels zu senken. Techno-ökonomische Simulationen können helfen, um auch die wirtschaftlichen CDR-Potenziale zu evaluieren, wobei die Unsicherheiten für einige CDR-Methoden wegen der noch kleinen Skalierung gross bleiben dürften. Die bis 2030 oder 2050 effektiv realisierte CO₂-Entfernung wird kritisch von den politischen-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einer griffigen sektorübergreifenden nationalen wie internationalen Klimapolitik sowie den Vermeidungskosten von Treibhausgasen (alternative Antriebe, Wärmepumpen, synthetische Treibstoffe, etc.) abhängen. Auch ein aktiver, offener Dialog mit der Bevölkerung kann dazu beitragen, dass der Zweck und die Funktionsweise der in der Schweiz angewendeten CDR-Methoden verstanden und breit unterstützt werden.

In einer früheren Abschätzung des Potenzials für CDR in der Schweiz durch Beuttler et al. (2019) wurde das theoretische Gesamtpotenzial auf rund 6 MtCO₂-eq/Jahr geschätzt (vgl. Tab. 1). Die Unterschiede zur Abschätzung der vorliegenden Studie stammen einerseits daher, dass ERW und die Holzernte von Beuttler et al. nicht berücksichtigt wurden. Andererseits wurde in Beuttler et al. für BECCS nur die bisher ungenutzte Biomasse zur energetischen Nutzung aus Thees et al. (2017) als Ausgangsmaterial vorgesehen (Trockengewicht ca. 101'000 t/Jahr), während in der vorliegenden Studie auch die bereits genutzte Biomasse einbezogen wurde (Trockengewicht ca. 246'000 t/Jahr). Beispielsweise wird Biomasse gegenwärtig bereits in Kehrlichtverwertungsanlagen oder Zementwerken verbrannt. Der Schweizer Bundesrat sowie der Verband der Schweizerischen Zementindustrie sieht vor, diese Anlagen mit CCS nachzurüsten (Cemsuisse, 2021; Bundesrat, 2022), wodurch ein CDR-Potenzial der bereits genutzten Biomasse realisiert werden kann.

Im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ (Kemmler et al., 2021a; 2021b; vgl. Tab. 1) wurde das Potenzial der Waldbewirtschaftung in der Schweiz auf einige Hunderttausend Tonnen bis maximal 2 MtCO₂-eq/Jahr geschätzt, wobei nicht definiert wurde, um welche Potenzialklasse es sich bei der Abschätzung handelt. Weiter wurde geschätzt, dass mit der Herstellung von Pflanzenkohle aus einem PJ Biomasse über 40 ktCO₂ eingespart werden könnten. Bei einem jährlichen Biomassepotenzial von 63 PJ entspräche dies 2.5 MtCO₂/Jahr. Dieser Wert beziffert jedoch, wie viel CO₂ eingespart und nicht wie viel CO₂ aus

der Atmosphäre entfernt werden könnte. Weiter wird auch Zement als CO₂-Senke als CDR-Methode diskutiert und das Potenzial auf 1.1 bis 2.5 MtCO₂/Jahr geschätzt. Für ERW wird nur ein globales Potenzial beziffert. Für BECCS und DACS werden keine Potenziale genannt. In den Szenarien der Energieperspektiven 2050+ wird eine Anwendung von CDR vorgesehen. Im Szenario «ZERO Basic» wird beispielsweise im Jahr 2050 CDR im Umfang von 2.04 MtCO₂/Jahr durch BECCS und 0.01 MtCO₂/Jahr durch Pflanzenkohle genutzt (vgl. Tab. 17, Kemmler et al., 2021b). Damit die Schweiz in diesem Szenario im Jahr 2050 Netto-Null Treibhausgasemissionen erreicht, werden im Ausland zusätzlich 4.7 MtCO₂/Jahr durch DACS entfernt und angerechnet.

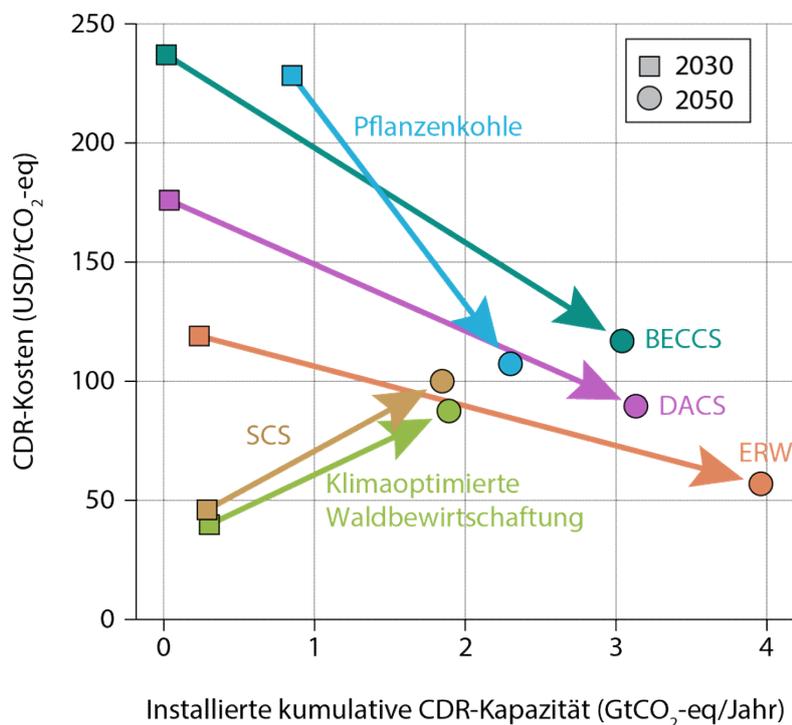


Abb. 7: Die geschätzte globale Kostenentwicklung für die berücksichtigten CDR-Methoden zwischen 2030 und 2050 als Folge der Skalierung. Abbildung angepasst aus Kahsar et al. (2022).

Die geschätzten Kosten für die verschiedenen CDR-Methoden variieren mit -42 bis 926 CHF/tCO₂-eq sehr stark innerhalb der untersuchten Literatur. Eher kostengünstige CDR-Methoden sind zumindest anfänglich die klimaoptimierte Waldbewirtschaftung sowie SCS. Alle anderen Methoden werden wahrscheinlich durch die Skalierung günstiger. Kahsar et al. (2022) kommt zum Schluss, dass die Variation zwischen den berücksichtigten CDR-Methoden künftig kleiner wird (vgl. Abb. 7). Allgemein sind Kostenschätzungen für die Zukunft unsicher.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für den Auftrag und insbesondere Dr. Sophie Wenger, Dr. Martin Jiskra, Dr. Regine Röthlisberger sowie Dr. Reto Burkard für die Projektbegleitung. Auch danken wir Christian Bach, Dr. Jannis Wernery von der EMPA, Prof. Dr. André Bardow, Dr. Viola Becattini, Nicoletta Brazzola, Marian Krüger, Dr. Moritz Laub, Prof. Dr. Marco Mazzotti, Prof. Dr. Anthony Patt, Prof. Dr. Johan Six, Prof. Dr. Michael Stauffacher, Juanita von Rothkirch von der ETH Zürich, Christian Bauer, Dr. Alexander

Muroyama vom PSI, Dr. Vanessa Burg, Lena Gubler, Dr. Esther Thürig von der WSL, Dr. Nikolas Hagemann vom Ithaka Institut, Dr. Sonja G. Keel, Dr. Jens Leifeld, Dr. Chloé Wüst von der Agroscope, Prof. Dr. Daniel Meier von der ZHAW sowie Dr. Sascha Nick und Prof. Dr. Philippe Thalman von der EPFL für den Austausch und die wertvolle Zusammenarbeit sowie Dr. Vincent Humphrey für die Hilfe beim Übersetzen. Abschliessend danken wir Christian Aebischer, Keith Anderson, Dr. Michael Bock, Clémence Dirac Ramohavelo, Elena Havlicek, Marjo Kunnala, Dr. Roger Ramer und Dr. Nele Rogiers vom BAFU sowie Dr. Carina Alles, Dr. Valentin Gischig, Dr. Andreas Haselbacher, Dr. Sandra Hermle, Christian Minnig, Denis Peytregnet und Jonathan Vouillamoz vom Bundesamt für Energie für das Feedback zum Berichtsentwurf.

Glossar

Carbon Capture and Storage (CCS; IPCC, 2021): “Ein Verfahren, bei dem ein relativ reiner Strom von CO₂ aus industriellen und energiebezogenen Quellen abgeschieden (aufgefangen), aufbereitet, komprimiert und zu einem Speicherort transportiert wird, um ihn langfristig von der Atmosphäre zu isolieren.” CCS ist ein Verfahren zur Verringerung der Emissionen und führt nicht zu einer Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre. Bei BECCS wird CCS genutzt, um bereits aus der Atmosphäre entferntes CO₂ trotz energetischer Nutzung der Biomasse am Wiedereintritt in die Atmosphäre zu hindern und gleichzeitig dauerhaft zu speichern.

Mitigation des Klimawandels (UNFCCC, 2022): “Im Zusammenhang mit dem Klimawandel ein menschlicher Eingriff zur Minderung des Klimawandels durch eine Verringerung der Quellen oder eine Verbesserung der Senken von Treibhausgasen. Beispiele umfasst dies die effizientere Nutzung fossiler Brennstoffe für industrielle Prozesse oder die Stromerzeugung, die Umstellung auf Sonnen- oder Windenergie, die bessere Isolierung von Gebäuden sowie die Ausweitung von Wäldern und anderen Treibhausgasenken, um grössere Mengen an Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen.”

CO₂-Entfernung / Carbon Dioxide Removal (CDR; IPCC, 2021): “CDR bezieht sich auf anthropogene Aktivitäten, die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten speichern. Es umfasst die anthropogene Verstärkung biologischer, geochemischer oder chemischer CO₂-Senken, schliesst aber die natürliche CO₂-Aufnahme aus, die nicht direkt durch menschliche Aktivitäten verursacht werden. Ausgeschlossen sind die Erhöhung von Kohlenstoffsinken der Biosphäre, hervorgerufen durch die CO₂-Düngung oder andere indirekte Effekte von menschlichen Aktivitäten.” Ein ausgeschlossener indirekter Effekt wäre beispielsweise die Aufnahme von CO₂ durch die Gewässer aufgrund des Henry-Gesetzes. CDR kann synonym zu negativen CO₂-Emissionen verwendet werden.

CO₂-Senke: siehe Senke.

Negativemissionstechnologien (NET): Negativemissionstechnologien werden genutzt, um CO₂ und andere Treibhausgase aus der Atmosphäre zu entfernen. Siehe CO₂-Entfernung bzw. Treibhausgasentfernung (nicht besprochen in diesem Bericht)

Netto-negative Treibhausgasemissionen: Zustand, in dem Metrik-gewichtet mehr Treibhausgase durch anthropogene Treibhausgassenken aus einem Bezugssystem entfernt werden, als durch Metrik-gewichtete anthropogene Treibhausgasemissionen in das Bezugssystem emittiert werden.

Netto-Null Treibhausgasemissionen, Treibhausgasneutralität (IPCC, 2021):

“Zustand, in dem die Metrik-gewichteten anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG) durch die Metrik-gewichtete anthropogene THG-Entfernung über einen bestimmten Zeitraum ausgeglichen sind. Die Quantifizierung von Netto-Null-THG-Emissionen hängt von der Metrik ab, die für den Vergleich von Emissionen und der Entfernung verschiedener Gase gewählt wird, sowie von dem für diese Metrik gewählten Zeithorizont.

Anmerkung 1: THG-Neutralität und Netto-Null-THG-Emissionen sind sich überschneidende Konzepte. Das Konzept der Netto-Null-THG-Emissionen kann auf globaler oder subglobaler Ebene (z. B. regional, national und subnational) angewendet werden. Auf globaler Ebene sind die Begriffe THG-Neutralität und Netto-Null-THG-Emissionen gleichwertig. Auf subglobaler Ebene wird der Begriff Netto-Null-Emissionen im Allgemeinen auf Emissionen und die Entfernung von Treibhausgasen unter direkter Kontrolle oder territorialer Verantwortung der berichtenden Einheit angewandt, während die Treibhausgasneutralität im Allgemeinen anthropogene Emissionen und die anthropogene Entfernung innerhalb und ausserhalb der direkten Kontrolle oder der territorialen Verantwortung der berichtenden Einheit umfasst. Die Bilanzierungsregeln von THG-Programmen oder -Regelungen können einen erheblichen Einfluss auf die Quantifizierung der relevanten Emissionen und die Entfernung haben.

Anmerkung 2: Im Rahmen des Pariser Regelwerks (Beschluss 18/CMA.1, Anhang, Absatz 37) haben sich die Vertragsparteien darauf geeinigt, GWP₁₀₀-Werte aus dem IPCC AR5 oder GWP₁₀₀-Werte aus einem späteren IPCC-Bewertungsbericht zu verwenden, um die Gesamtemissionen und den Abbau von Treibhausgasen zu melden. Darüber hinaus können die Vertragsparteien andere Metriken verwenden, um zusätzliche Informationen über die Gesamtemissionen und die Entfernung von Treibhausgasen zu melden”

Senke (IPCC, 2021): “Jeder Prozess, jede Aktivität oder jeder Mechanismus, der ein Treibhausgas, ein Aerosol oder einen Vorläufer eines Treibhausgases aus der Atmosphäre entfernt (UNFCCC Artikel 1.8 (UNFCCC, 1992)).” Eine Senke, die durch anthropogene Aktivitäten CO₂ dauerhaft entfernt, gilt als CO₂-Entfernung.

Sequestrierung: Prozess zur Speicherung von Treibhausgasen in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten.

Literaturverzeichnis

Austin, K. G., Baker, J. S., Sohngen, B. L., Wade, C. M., Daigneault, A., Ohrel, S. B., Ragnauth, S., & Bean, A. (2020). The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change. *Nature Communications*, 11(1), 5946.

<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19578-z>

BAFU. (2021a). Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019: National Inventory Report. Including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of April 2021. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU (Hrsg.). (2021b). Jahrbuch Wald und Holz 2021. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2125: 103 S.

Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et al. (2020). Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248.

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>

Beuttler, C., Keel, S. G., Leifeld, J., Schmid, M., Berta, N., Gutknecht, V., Wohlgemuth, N., Brodmann, U., Stadler, Z., Tinibaev, D., Wlodarczak, D., Honegger, M., & Stettler, C. (2019). The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy – Fundamentals and Recommended Actions. Report by Risk Dialogue Foundation. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.

BFS. (2021). Arealstatistik (AREA). Bundesamt für Statistik.

Bowman G., L. Ayed und V. Burg: The role of anaerobic digestion in the circular economy: Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland, challenges and future perspectives. In preparation.

Brandl, P., Bui, M., Hallett, J. P., and Mac Dowell, N. (2021). Beyond 90 Possible, but at what cost?, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105, 103 239,

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103239>

Bundesrat. (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. Bern.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/62745.pdf>

Bundesrat. (2021). Langfristige Klimastrategie der Schweiz.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/65874.pdf>

Bundesrat. (2022). CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET): Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können. Bericht des Bundesrates. Bern.

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/71551.pdf>

Carbfix. (2021). Our Story. Carbfix. Last accessed: 8.8.2022. <https://www.carbfix.com/our-story>

Cemsuisse. (2021). Roadmap 2050: Klimaneutraler Zement als Ziel. Bern.

Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. (2010). Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J Geosci* 103, 427–455. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0030-4>

Consoli, C.P., Wildgust, N. (2017). Current Status of Global Storage Resources. *Energy Procedia* 114, 4623–4628. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1866>

Diamond, L. (2019). Use hot water, store CO₂ – the potential deep beneath our feet. Last accessed: 8.8.2022. <https://nfp-energie.ch/en/projects/960/>

DOE. (2014). FE/NETL CO₂ Saline Storage Cost Model: Model Description and Baseline Results. Report No. DOE/NETL-2014/1659. Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, DOE.

Eckle P., Spokaite M., Krueger M. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant.

Erans, M., Sanz-Pérez, E. S., Hanak, D. P., Clulow, Z., Reiner, D. M., and Mutch, G. A. (2022). Direct air capture: process technology, technoeconomic and socio-political challenges, *Energy Environ. Sci.*, 15, 1360–1405, <https://doi.org/10.1039/D1EE03523A>

Fasihi, M., Efimova, O., and Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants, *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M., and Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects, *Environmental Research Letters*, 13, 063 002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

Giardini, D., Guidati, G. (eds.), Amann, F., Driesner, T., Gischig, V., Guglielmetti, L., Hertrich, M., Holliger, K., Krause, R., Laloui, L., Lateltin, O., Lecampion, L., Löw, S., Maurer, H., Mazzotti, M., Meier, P., Moscariello, A., Saar, M.O., Spada, M., Valley, B., & Zappone, A. (2021). *Swiss Potential for Geothermal Energy and CO₂ Storage*, Synthesis Report. ETH Zurich.

Guillaume, T., Makowski, D., Libohova, Z., Elfouki, S., Fontana, M., Leifeld, J., Bragazza, L., and Sinaj, S. (2022). Carbon storage in agricultural topsoils and subsoils is promoted by including temporary grasslands into the crop rotation, *Geoderma*, 422, 115 937, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115937>

Goll, D.S., Ciais, P., Amann, T. et al. (2021). Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nat. Geosci.* 14, 545–549.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>

Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Oelkers, E. H., Clark, D. E., Þór Arnarson, M., Sigfússon, B., Snæbjörnsdóttir, S., Matter, J. M., Stute, M., Júlíusson, B. M., and Gíslason, S. R. (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,
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>

Hagens M, Hoosbeek M, Smet I, Bijma J, Hartmann J, Steffens R & Paessler D. (2021). Quantifying CO₂ Removal Through Enhanced Weathering: Grassland and pot Experiments.
<https://doi.org/10.7185/gold2021.5775>

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
<https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Kahsar et al. (2022). Kahsar Rudy, Guy Wohl, Charlie Bloch, and James Newcomb, Scoping the Potential Need for Direct Air Capture, RMI, 2022, <https://www.third-derivative.org/first-gigaton-captured#insight-brief-2>.

Kearns, J., Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Kheshgi, H., Chen, Y.-H.H., Paltsev, S., Herzog, H. (2017). Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide. *Energy Procedia* 114, 4697–4709.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., and Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere, *Joule*, 2, 1573–1594,
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Kemmler A., Kirchner a., Kreidelmeyer S., et al. (2021a). *Energieperspektiven 2050+:* Technischer Bericht. Herausgegeben durch Prognos AG, INFRAS AG, TEP Energy GmbH, Ecoplan AG. Im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE, Bern, Switzerland.

Kemmler A., Lübbers S., Ess F., Thormeyer Ch. und Althaus H. (2021b). *Energieperspektiven 2050+:* Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale,

Kosten und Einsatz. Herausgegeben durch Prognos AG, INFRAS AG, TEP Energy GmbH, Ecoplan AG. Im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE, Bern, Switzerland.

Krekel, D., Samsun, R. C., Peters, R., and Stolten, D. (2018). The separation of CO₂ from ambient air – A techno-economic assessment, *AppliedEnergy*, 218, 361–381, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.144>

Lamlom S.H. und R.A. Savidge. (2003). A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, (25) 4: 381-388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)

Lee, J., Necpálová, M., and Six, J. (2020). Biophysical potential of organic cropping practices as a sustainable alternative in Switzerland, *Agricultural Systems*, 181, 102 822, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102822>

Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A. et al. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 14, 883–892 . <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>

LFI (2015). Schweizerisches Landesforstinventar: Waldflächen pro Kanton. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt.

Matthews, D. H. (2010). Can carbon cycle geoengineering be a useful complement to ambitious climate mitigation? *Carbon Management*, 1:1, 135-144, <https://doi.org/10.4155/cmt.10.14>

Maggiore L., E. Bonato, A. Terenzi. (2021). CO₂NET Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO₂ Sammel-Netzwerk in der Schweiz. Der Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA). <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47346>

McQueen, N., Gomes, K. V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., and Wilcox, J. (2021). A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future, *Progress in Energy*, 3, 032 001, <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>

Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., & del Mar Zamora Dominguez, M. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. In *Environmental Research Letters* (Vol. 13, Issue 6, p. 063001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>

NASEM. (2019). Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>.

Nesme, T., Barbieri, P., Gaudaré, U., Pellerin, S., and Angers, D. A. (2021). Sound methods are needed to assess GHG mitigation potential of organic farming deployment. A comment on Lee et al (2020), *Agricultural Systems*, 187, 102–994, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102994>

Oreggioni, G.D., Gowreesunker, B.L., Tassou, S.A., Bianchi, G., Reilly, M., Kirby, M.E., Toop, T.A. und Theodorou, M.K. (2017). Potential for Energy Production from Farm Wastes Using Anaerobic Digestion in the UK: An Economic Comparison of Different Size Plants. *Energies*, 10, 1396. <https://doi.org/10.3390/en10091396>

Phyllis2. (2021). Database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar. TNO Biobased and Circular Technologies. Last accessed: 13.5.2022. <https://phyllis.nl/>

Pilorgé H., Kolosz B., Wu G. C., and Freeman J. (2021). Global Mapping of CDR Opportunities. CDR Primer, edited by J Wilcox, B Kolosz, J Freeman.

Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J. And Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17: 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J., Chapman, M., Daioglou, V., Deppermann, A., Doelman, J., Emmet-Booth, J., Engelmann, J., Fricko, O., Frischmann, C., Funk, J., Grassi, G., Griscom, B., Havlik, P., Hanssen, S., Humpenöder, F., Landholm, D., ... Lawrence, D. (2021). Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, 00, 1– 34. <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>

Rosa, L., Sanchez, D. L., and Mazzotti, M. (2021). Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe, *Energy Environ. Sci.*, 14, 3086–3097, <https://doi.org/10.1039/D1EE00642H>

Schmidt, H., Hagemann, N., Abächerli, F., Leifeld, J., & Bucheli Th. (2021). Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, (112). 2296–729X. <https://doi.org/10.34776/as112g>

Soils Revealed. (2020). Soils revealed. Last accessed 8.8.2022. <https://soilsrevealed.org/>

Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Glob Change Biol*, 20: 2708–2711. <https://doi.org/10.1111/gcb.12561>

Smith, P., Haszeldine, R. S., and Smith, S. M. (2016). Preliminary assessment of the potential for, and limitations to, terrestrial negative emission technologies in the UK, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 18, 1400–1405, <https://doi.org/10.1039/C6EM00386A>

Snæbjörnsdóttir, S. and Gislason, S. R. (2016). CO₂ Storage Potential of Basaltic Rocks Offshore Iceland, *Energy Procedia*, 86, 371–380, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.038>

Stadelmann G., A. Herold, M. Didion, B. Vidondo, A. Gomez, E. Thürig. (2016) Holzerntepotezial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. 167 (3). 152–161. <https://doi.org/10.3188/szf.2016.0152>

Stripe. (2021). Application from Nuestartk - Stripe. Last accessed 8.8.2022. <https://github.com/stripe/carbon-removal-source-materials/blob/master/Project%20Applications/Spring2021/Nuestartk%20-%20Stripe%20Spring21%20CDR%20Purchase%20Application.pdf>

Strunge, T., Renforth, P. & Van der Spek, M. (2022). Towards a business case for CO₂ mineralisation in the cement industry. *Commun Earth Environ* 3, 59. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>

Taverna R., Hofer P., Werner F., Kaufmann E., Thürig E. (2007). CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. *Umwelt-Wissen* Nr. 0739. Bundesamt für Umwelt, Bern. 102 S. Daten zur Verfügung gestellt von Taverna R..

Taylor, L. L., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Rau, G. H., Blum, J. D., and Beerling, D. J. (2021). Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition. *Biogeosciences*, 18, 169–188. <https://doi.org/10.5194/bg-18-169-2021>

Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., & Lemm, R. (2017). Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung: Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, WSL Berichte, Heft 57.

Tiefenthaler J, Braune L, Bauer C, Sacchi R and Mazzotti M. (2021). Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector. *Front. Clim.* 3:729259. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.729259>

UNFCCC. (2022). UNFCCC Process: Glossary of climate change acronyms and terms. Last accessed 9.8.2022. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms>

Voskian, S., & Hatton, T. A. (2019). Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*, 12(12), 3530–3547. <https://doi.org/10.1039/c9ee02412c>

Wang, T., Yi, Z., Song, J., Zhao, C., Guo, R., and Gao, X. (2022). An industrial demonstration study on CO₂ mineralization curing for concrete, *iScience*, 25, 104 261, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104261>

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz

Wohland, J., Witthaut, D., Schleussner, C.-F. (2018). Negative emission potential of Direct Air Capture powered by renewable excess electricity in Europe. *Earth's Future*, 6, 1380–1384. <https://doi.org/10.1029/2018EF000954>

Anhang

A1 Details zur Abschätzung der CDR-Potenziale von BECCS

Die Tabelle A1 zeigt, welche Menge CO₂ umgerechnet in der zur energetischen Nutzung in der Schweiz nachhaltig verfügbaren Biomasse enthalten ist und bei einer energetischen Nutzung mit CCS als BECCS zu CDR führt. Thees et al. (2017) schätzte die nachhaltig realisierbaren Biomassepotenziale zu energetischen Nutzung in der Schweiz ab. Dabei wird ein Teil der Biomasse direkt energetisch genutzt (holzige Biomasse), während ein anderer Teil teilweise zu Biogas umgesetzt wird und sowohl das Biogas als auch die restliche Biomasse energetisch genutzt wird (nicht-holzige Biomasse wie landwirtschaftliche Nebenprodukte, Hofdünger, organische Industrieabfälle, organischer Kehrriech, Grüngut und Klärschlamm). Der Kohlenstoffgehalt der trockenen Biomasse wird mittels Literaturwerten auf 3.8 MtC/Jahr geschätzt (basierend auf Lamlo und Savidge, 2003; Oreggioni et al., 2017; Phillis2, 2021; Bowman et al., in prep.). Mit der Annahme, dass jedes Kohlenstoffmolekül durch die Pflanze einem zuvor aus der Atmosphäre entfernten Molekül CO₂ entspricht, enthält die Biomasse 12.0 MtCO₂-eq/Jahr. Diese Menge würde bei der energetischen Nutzung ohne CCS wieder in die Atmosphäre emittiert. Werden bei der energetischen Nutzung durch CCS 90% des CO₂ abgeschieden und dauerhaft gespeichert, ergibt dies ein technisches CDR-Potenzial von 10.8 MtCO₂/Jahr für BECCS.

Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz

Tab. A1: Die zur energetischen Nutzung in der Schweiz nachhaltig verfügbare Biomasse, der geschätzte Kohlenstoffgehalt sowie die umgerechnet gespeicherte Menge an CO₂, welche die Biomasse zuvor aus der Atmosphäre entfernte.

		Source: Thees et al., 2017					C content (t _c /t _{dw})	Source	C in biomass (Mt/yr)	C in biogas (Mt/yr)	CO ₂ stored in biomass (Mt/yr)	
Feedstock	Sub-categories	Dry weight (t tw)	Primary energy content (PJ)	Potential biomethane production (PJ)								
Woody	Forest wood*1	Hardwood (with bark)	26.1			0.48	Lamliom and Savidge	0.894	0.000	3.276		
		Softwood (with bark)	1183770	16.1		0.51	Lamliom and Savidge	0.568	0.000	2.082		
	Wood from landscape maintenance*1	Residential area	638880	10.0				0.326	0.000	1.194		
		Road sides	305257	4.8				0.156	0.000	0.570		
		Agricultural area	61863	1.0			0.51	Bowman et al., in prep.	0.032	0.000	0.116	
		Groves and shrubberies	73834	1.1			0.51	Bowman et al., in prep.	0.038	0.000	0.138	
	Waste wood	Hedges	56855	0.9			0.51	Bowman et al., in prep.	0.029	0.000	0.106	
		Shore area	22800	0.4			0.51	Bowman et al., in prep.	0.012	0.000	0.043	
	Non-woody	Wood residues	Hedges	48633	0.8			0.51	Bowman et al., in prep.	0.025	0.000	0.091
			Shore area	41272	0.6			0.51	Bowman et al., in prep.	0.021	0.000	0.077
Agricultural crop by-products		Natural wood (only mechanically processed)	653676	11.7			0.51	Bowman et al., in prep.	0.333	0.000	1.222	
		Glued, painted, laminated, varnished wood	152415	2.7			0.51	Bowman et al., in prep.	0.078	0.000	0.285	
		Halogen-organic compounds (e.g. plated with PVC)	338199	6.0			0.51	Bowman et al., in prep.	0.172	0.000	0.632	
		Treated with wood preservatives (Railway sleepers, electric poles, etc.)	100303	1.8			0.51	Bowman et al., in prep.	0.051	0.000	0.187	
Animal manure*1		Other crops	62760	1.1			0.51	Bowman et al., in prep.	0.032	0.000	0.117	
		Intermediate crops	458041	7.6			0.51	Bowman et al., in prep.	0.234	0.000	0.856	
Non-woody		Organic fraction of household garbage	Cereals (chaff only)	134485	2.6	1.0			0.066	0.025	0.241	
			Other crops	84894	1.7	0.6			0.49	Phyllis2	0.042	0.014
	Green waste from households and landscape	Intermediate crops	28559	0.6	0.3			0.49	Phyllis2	0.014	0.007	0.051
		Cows	21032	0.4	0.1			0.49	Phyllis2	0.010	0.003	0.038
		Pigs	1692924	26.9	9.9			0.59	Oreggioni et al., 2017	0.975	0.246	3.571
		Horses	1279489	20.2	7.0			0.54	Phyllis2	0.750	0.175	2.748
	Commercial and industrial organic waste	Horses	81134	1.1	0.5			0.54	Phyllis2	0.044	0.012	0.161
		Sheep	178212	3.2	1.4			0.54	Phyllis3	0.097	0.035	0.355
	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Goat	104916	1.6	0.7			0.54	Phyllis4	0.057	0.017	0.209
		Poultry	20964	0.3	0.1			0.54	Phyllis5	0.011	0.003	0.042
Sum	Organic fraction of household garbage	Biogenic fraction	28209	0.4	0.2			0.54	Phyllis6	0.015	0.005	0.056
		Paper, cardboard, etc...	210455	3.9	0.4			0.52	Phyllis2	0.103	0.010	0.378
Sum	Green waste from households and landscape	Other organic fraction	35336	0.5	0.4			0.48	Phyllis2	0.018	0.010	0.067
		Already collected separately today	157734	3.0	0.0			0.48	Phyllis2	0.076	0.000	0.277
Sum	Commercial and industrial organic waste	Organic fraction of the household garbage*2	17385	0.4	0.0			0.53	Bowman et al., in prep.	0.009	0.000	0.034
		Food processing	391238	5.8	4.5			0.53	Bowman et al., in prep.	0.206	0.111	0.756
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Catering	264028	3.9	3.0			0.53	Bowman et al., in prep.	0.140	0.075	0.513
		Retailers	127211	1.9	1.5			0.52	Phyllis2	0.066	0.036	0.243
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Tobacco industry	238186	2.7	2.2			0.52	Phyllis2	0.124	0.054	0.453
		Paper production	172039	1.9	1.5			0.52	Phyllis2	0.089	0.037	0.328
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Printing industry	32559	0.6	0.5			0.52	Phyllis2	0.017	0.013	0.062
		Textile production	25732	0.2	0.2			0.52	Phyllis2	0.013	0.004	0.049
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Pharmaceutical industry	1221	0.0	0.0			0.50	Assumption: 50% C	0.001	0.000	0.002
		Pharmaceutical industry	5486	0.0	0.0			0.48	Phyllis2	0.003	0.010	0.010
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Pharmaceutical industry	0	0.0	0.0			0.50	Assumption: 50% C	0.000	0.000	0.000
		Pharmaceutical industry	945	0.0	0.0			0.50	Assumption: 50% C	0.000	0.000	0.000
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Pharmaceutical industry	204	0.0	0.0			0.50	Assumption: 50% C	0.000	0.000	0.000
		Pharmaceutical industry	347272	4.9	2.6			0.51	Phyllis2	0.177	0.065	0.649
Sum	Sewage sludge from central t Fresh sludge (before Fermentation)	Pharmaceutical industry	97.0	20.5				3.267	0.511	11.973		
		Pharmaceutical industry										

Methane in Biogas: assuming a mole fraction of 40% CO₂ except for manure

Sources: Thees et al., 2017; <http://doi.org/10.16904/18>

S.H.Lamliom and R.A.Savidge, 2003; doi: 10.1016/S0961-9534(03)00033-3

G. Bowman, L. Ayed, V. Burg: The role of anaerobic digestion in the circular economy: Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland, challenges and future perspectives. In preparation.

Phyllis2; <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>

Oreggioni et al., 2017; <https://doi.org/10.3390/en10091396>