

# Working Paper

Herausforderungen zur separaten Ausweisung von Klimazielen für natürliche und technische Senken

Öko-Institut Working Paper 1/2024

Wolfram Jörß, Sabine Gores, Anne Siemons, Victoria Liste  
Öko-Institut, Berlin

Sebastian Lübbers, Saskia Lengning  
Prognos AG, Berlin



**Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.**

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)

[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

**Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office**

Postfach / P.O. Box 17 71

79017 Freiburg. Deutschland / Germany

Tel.: +49 761 45295-0

**Büro Darmstadt / Darmstadt Office**

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland / Germany

Tel.: +49 6151 8191-0

**Büro Berlin / Berlin Office**

Borkumstraße 2

13189 Berlin. Deutschland / Germany

Tel.: +49 30 405085-0

## Working Paper

### Herausforderungen zur separaten Ausweisung von Klimazielen für natürliche und technische Senken

Wolfram Jörß, Sabine Gores, Anne Siemons, Victoria Liste  
Öko-Institut, Berlin

Sebastian Lübbers, Saskia Lengning  
Prognos AG, Berlin

Working Paper 1/2024 Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

Februar 2024

Download: [www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Senken-in-Klimazielen.pdf](http://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Senken-in-Klimazielen.pdf)

Diese Publikation wurde erstellt im Rahmen des vom Umweltbundesamt finanzierten F&E-Vorhabens „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ 3722 41 502 0).

Die in dieser Publikation vertretenen Analysen und Einschätzungen liegen allein in der Verantwortung der Autor\*innen und repräsentieren nicht notwendigerweise die Meinung des Umweltbundesamtes.



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz. Öko-Institut e.V. [2024]

This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0. Oeko-Institut e.V. [2024]

Die Working Paper Series des Öko-Instituts ist eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge aus der Forschungsarbeit des Öko-Instituts e.V. Sie präsentieren und diskutieren innovative Ansätze und Positionen der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung. Die Serie ist offen für Arbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Working Paper entstehen in einem sorgfältigen wissenschaftlichen Prozess ohne externes Peer Review.

Oeko-Institut's Working Paper Series is a collection of research articles written within the scope of the institute's research activities. The articles present and discuss innovative approaches and positions of current sustainability research. The series is open to work from researchers of other institutions. The Working Papers are produced in a scrupulous scientific process without external peer reviews.

## Zusammenfassung

In diesem Bericht klären wir zunächst die von stark voneinander divergierenden Ansätzen zur Definition von Senken und zugehörigen CO<sub>2</sub>-Entnahmen verschiedenen regulatorischen Kontexten, einerseits Treibhausgas-Inventaren und andererseits Zertifizierungssystemen für Entnahmeaktivitäten. Weiterhin geben wir einen kurzen Überblick über als ‚Senken‘ bzw. ‚CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen‘ diskutierte Prozesse bzw. Prozessketten, die ggf. für differenzierte Senkenziele zu typologisieren wären. Wir fassen den Stand der Typologisierung von Senken als ‚natürlich‘ bzw. ‚technisch‘ in der Literatur zusammen, stellen alternative Ansätze zur Typologisierung von Senken vor und ordnen verschiedene Entnahmooptionen in verschiedenen Typologisierungen ein. Aus der Analyse ziehen wir Schlussfolgerungen zur Differenzierung von ‚natürlichen‘ bzw. ‚technischen‘ oder anders differenzierten CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen in Klimazielen: Um Doppelzählungen zu vermeiden, müssen Senkenziele, die komplementär zu Emissionsminderungszielen angelegt sein sollen, genau wie die komplementären Emissionsminderungsziele auf die Definitionen im Kontext der THG-Inventare zurückgreifen. Falls Senkenziele allerdings einen untergeordneten Charakter zu übergeordneten umfassenden Emissionsminderungszielen haben sollen, sind Doppelzählungen unschädlich und es besteht Freiheit in der Wahl der Definitionen, die dann auch auf Zertifizierungssysteme Bezug nehmen können.

## Abstract

In this report, we first clarify the widely divergent approaches to defining sinks and associated CO<sub>2</sub> removals in different regulatory contexts, on the one hand greenhouse gas inventories and on the other certification systems for removal activities. Furthermore, we provide a brief overview of processes or process chains discussed as 'sinks' or 'carbon removal options', which could be typologised for differentiated sink targets. We summarise the status of typologisation of sinks as 'natural' or 'technical' in literature, present alternative approaches to the typologisation of sinks and classify various removal options in different typologies. From the analysis, we draw conclusions are related to the differentiation of 'natural' or 'technical' or otherwise differentiated carbon removal options in climate targets: To avoid double counting, removal targets that are intended to be complementary to emission reduction targets must refer to the definitions in the context of the GHG inventories, just like the complementary emission reduction targets. However, if removal targets are to have a subordinate character to overarching comprehensive emission reduction targets, double counting does no harm and there is freedom in the choice of removal definitions, which could then also refer to certification systems.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung / Hintergrund</b>	<b>7</b>
<b>2 Definition von Senken und CO<sub>2</sub>-Entnahmen in Abhängigkeit vom regulatorischen Kontext</b>	<b>7</b>
2.1 Senken und CO <sub>2</sub> -Entnahmen im Kontext von Zertifizierungssystemen	8
2.2 Senken und CO <sub>2</sub> -Entnahmen im Kontext von nationalen THG-Inventaren	8
2.3 Vergleichbarkeit von zertifizierten CO <sub>2</sub> -Entnahmen mit CO <sub>2</sub> -Entnahmen in THG-Inventaren	10
2.4 Schlussfolgerung für die vorliegende Analyse	10
<b>3 Überblick über verschiedene Optionen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme</b>	<b>11</b>
<b>4 Typologisierung von Senken als ‚natürlich‘ bzw. ‚technisch‘ in der Literatur</b>	<b>13</b>
<b>5 Alternative Ansätze zur Typologisierung von Senken</b>	<b>14</b>
<b>6 Einordnung einzelner Entnahme- und Speicheraktivitäten in verschiedenen Typologisierungsansätzen</b>	<b>15</b>
<b>7 Schlussfolgerungen zur Abbildung von ‚natürlichen‘ und ‚technischen‘ Senken in Klimazielen</b>	<b>16</b>
7.1 Allgemeine Schlussfolgerungen zu ggf. differenzierten Senken in der Zielarchitektur	16
7.2 Natürliche / technische Senken in inventarbasierten Zielen	17
7.3 Natürliche / technische Senken in zertifikatsbasierten Zielen	18
<b>Anhang I. 20</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6-1: Übersicht über die wesentlichen CO <sub>2</sub> -Entnahmeaktivitäten und deren Schlüsseigenschaften	16
--	----

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-1: Betrachtete Studien zur Definition von technischen und natürlichen Senken	20
Tabelle 7-2: Beschriftung einfügen	21

## 1 Einleitung / Hintergrund

Im Hinblick auf sowohl für die EU (2050) als auch für Deutschland (2045) formulierte THG-Neutralitätsziele und auf für nachfolgende Jahre angestrebte Netto-Negativemissionen entfaltet sich eine Debatte über die Rolle von CO<sub>2</sub>-Senken bei der Erreichung dieser Ziele und über eine Fortentwicklung der jeweiligen Zielarchitekturen inklusive einer etwaigen Ausweisung expliziter Senkenziele, ggf. auch für Zwischenziele z.B. für 2035 oder 2040.

Von Interesse ist in diesem Kontext auch der Referentenentwurf zur Novelle des Bundes Klimaschutzgesetzes (KSG) vom Juni 2023, in dem mit § 3b ein „Beitrag technischer Senken“ vorgesehen ist, der zusätzlich zum bereits geltenden § 3a „Beitrag des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ gelten würde.

Vor diesem Hintergrund diskutiert dieses Papier Optionen und Rahmenbedingungen für die Abgrenzung sog. ‚natürlicher‘ und ‚technischer‘ Senken und ggf. alternativer Abgrenzungen im Kontext klimapolitischer Zielsetzungen.

Die Analyse beginnt in Kapitel 2 mit einer Klärung von stark voneinander divergierenden Ansätzen zur Definition von Senken und zugehörigen CO<sub>2</sub>-Entnahmen verschiedenen regulatorischen Kontexten, da für verschiedene Typen von Klimazielen verschiedene Senkenbegriffe sinnvoll sind.

Kapitel 3 gibt einen kurzen Überblick über als ‚Senken‘ bzw. ‚CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen‘ diskutierte Prozesse bzw. Prozessketten, die ggf. für differenzierte Senkenziele zu typologisieren wären. In Kapitel 4 wird der Stand der Typologisierung von Senken als ‚natürlich‘ bzw. ‚technisch‘ in der Literatur zusammengefasst. In Kapitel 5 werden alternative Ansätze zur Typologisierung von Senken vorgestellt und in Kapitel 6 wird eine Einordnung verschiedener Entnahmooptionen in verschiedenen Typologisierungen vorgenommen.

In Kapitel 7 werden schließlich Schlussfolgerungen zur Differenzierung von ‚natürlichen‘ bzw. ‚technischen‘ oder anders differenzierten CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen in Klimazielen gezogen.

## 2 Definition von Senken und CO<sub>2</sub>-Entnahmen in Abhängigkeit vom regulatorischen Kontext

CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Kontext von **nationalen Treibhausgasinventaren** und **auf den Inventaren basierenden nationalen THG-Zielen** sind grundsätzlich zu unterscheiden von **projektbezogenen** CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Kontext von **Zertifizierungssystemen für freiwillige oder verpflichtende Kohlenstoffmärkte**. Wie im Folgenden diskutiert, sind die Quantifizierungsansätze für CO<sub>2</sub>-Entnahmen (wie CO<sub>2</sub>-Emissionen gemessen in der Einheit ‚t CO<sub>2</sub>‘) grundsätzlich verschieden zwischen beiden Kontexten und lassen sich nur in Ausnahmefällen konsistent ineinander überführen.

Senken (englisch: sinks) sind die Prozesse, Aktivitäten oder Mechanismen, durch die CO<sub>2</sub> der aus der Atmosphäre entnommen wird (CO<sub>2</sub>-Entnahme, englisch: CO<sub>2</sub> removals). ‚Senken‘ sind nicht zu verwechseln mit ‚CO<sub>2</sub>-Speichern‘ (wie der in Wäldern gespeicherten Biomasse oder unterirdischen Kohlenstoff- oder CO<sub>2</sub>-Lagerstätten). **Senken vergrößern** durch CO<sub>2</sub>-Entnahme die **Kohlenstoffspeicher außerhalb der Atmosphäre** und reduzieren den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre. Senken wirken analog/invers zu THG-‚Quellen‘, welche durch CO<sub>2</sub>-Emissionen den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre erhöhen und Kohlenstoffspeicher außerhalb der Atmosphäre verkleinern.

## 2.1 Senken und CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Kontext von Zertifizierungssystemen

Ein EU-weiter regulatorischer Rahmen für die Zertifizierung von projektbezogenen CO<sub>2</sub>-Entnahmen wurde Ende 2022 von der Europäischen Kommission mit dem Entwurf einer Verordnung zum ‚Carbon Removal Certification Framework‘ (CRCF) vorgeschlagen.

In diesem Kontext ist der Begriff ‚Senke‘ in erster Näherung äquivalent zum Begriff ‚CO<sub>2</sub>-Entnahmetätigkeit‘ (englisch: ‚carbon removal activity‘) gemäß dem CRCF-Vorschlag.

In Zertifizierungssystemen werden **CO<sub>2</sub>-Entnahmen von Projekten** immer im Vergleich zu einer **Baseline** quantifiziert, welche die hypothetische Emissions-/Entnahme Situation ohne das zu bewertende Projekt abbildet. Für die zertifizierte CO<sub>2</sub>-Entnahme ist deshalb die ‚**Zusätzlichkeit**‘ gegenüber der Baseline wesentlich. Des Weiteren wird die CO<sub>2</sub>-Entnahme als **Netto-Entnahme**<sup>1</sup> über eine ganze **Prozesskette** bilanziert, welche z.B. die Bereitstellung von Energie, die Einbindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in Pflanzen, die Rückgewinnung von CO<sub>2</sub> aus Abgasen, den Transport von Zwischenprodukten oder CO<sub>2</sub> und/oder die Verbringung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> in geologische Lagerstätten umfassen kann. Die **Bilanzierung** von CO<sub>2</sub>-Entnahmen erfolgt zudem als Integral **über längere Zeitintervalle**, in diesem Zusammenhang ist die **Permanenz** der außer-atmosphärischen Speicherung des der Atmosphäre entnommenen CO<sub>2</sub> von sehr hoher Relevanz, insbesondere wenn zertifizierte CO<sub>2</sub>-Entnahmen zum bilanziellen Ausgleich von CO<sub>2</sub>-Emissionen verwendet werden sollen. Da die CO<sub>2</sub>-Entnahme auf Projektebene bilanziert wird, kann die Bilanzierung üblicherweise **mit Methoden höherer Granularität** und somit mit höherer Genauigkeit erfolgen als im nationalen THG-Inventar.

## 2.2 Senken und CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Kontext von nationalen THG-Inventaren

In **nationalen THG-Inventaren**, die gemäß den vom **IPCC** entwickelten **Richtlinien** erstellt und gemäß unter der **UNFCCC** vereinbarten **Berichtspflichten** regelmäßig berichtet werden, werden CO<sub>2</sub>-Entnahmen nicht als Netto-Entnahmen von Prozessketten verstanden, sondern für jeden einzelnen emissionsverursachenden Teilprozess (‚Quelle‘) bzw. CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernenden Prozess (‚Senke‘) werden getrennt für verschiedenen Quellen- bzw. Senken-Kategorien Brutto- CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. **Brutto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen** berichtet, die erst für die Berechnung von **nationalen THG-Gesamtsummen** miteinander zu **Netto-Emissionen** bzw. langfristig denkbar auch zu Netto-Entnahmen verrechnet werden. Für das Inventar werden im Gegensatz zur Zertifizierung von Entnahmen **keine** (hypothetischen) **Baselines** berücksichtigt, **‚Zusätzlichkeit‘ spielt keine Rolle**.

Zusätzlich zu Emissionen und Entnahmen kann in Inventaren auch die **Rückgewinnung von CO<sub>2</sub>** (englisch: **CO<sub>2</sub> recovery**) berichtet werden, wenn aus Abgasströmen vor dem Entweichen in die Atmosphäre CO<sub>2</sub> abgeschieden und in dauerhafte Produkte oder Lagerstätten abgeschieden wird. In diesem Fall werden für die entsprechende Quellkategorie Bruttoemissionen (CO<sub>2</sub> im Abgas vor der Abscheidung), Brutto-Rückgewinnung (abgeschiedenes CO<sub>2</sub>) sowie Netto-Emissionen (tatsächlich in die Atmosphäre gelangtes CO<sub>2</sub>) berichtet. Für die Berechnung von nationalen THG-Gesamtsummen im jährlichen THG-Inventar ist die Brutto- CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung mathematisch äquivalent zur Brutto- CO<sub>2</sub>-Entnahme.

---

<sup>1</sup> Im-CRCF-Vorschlag entspricht die Nettoentnahme dem ‚net carbon removal benefit‘, in der deutschen Version des Vorschlags (schlecht) übersetzt als ‚Nutzen der Netto-CO<sub>2</sub>-Entnahmen‘.



### CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung bei ‚fossilem CCS‘ und bei ‚BECCS‘

Ein Beispiel für CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung ist die Abscheidung von fossilem CO<sub>2</sub> aus Kraftwerken zur Speicherung in geologischen Formationen (‚**fossiles CCS**‘).

Im Beispiel der Abscheidung und geologischen Speicherung von biogenem CO<sub>2</sub> aus einer Holzfeuerung (‚**holzbasiertes BECCS**‘) würde in der Quellkategorie der Verbrennung von Energieträgern eine Brutto-Rückgewinnung berichtet und in der Landnutzungs-Kategorie (LULUCF) eine Brutto-Emission, die den Verlust des im Holz gespeicherten Kohlenstoffes widerspiegelt. In der Inventarperspektive ist holzbasiertes BECCS also für das Jahr der Verbrennung und Abscheidung keine Netto-Senke, sondern bestenfalls **CO<sub>2</sub>-neutral**.

Für das Beispiel der Abscheidung und geologischen Speicherung von biogenem CO<sub>2</sub> aus einer Feuerungsanlage für Pflanzenöl (‚**BECCS aus Anbaubiomasse**‘) würde wie bei holzbasiertem BECCS in der Quellkategorie der Verbrennung von Energieträgern eine Brutto-Rückgewinnung berichtet werden. Da in der LULUCF-Kategorie des THG-Inventars die unterjährige Einbindung von CO<sub>2</sub> in Anbaubiomasse nicht bilanziert wird und auch in der Verbrennungskategorie des Inventars die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung von Biomasse nicht als CO<sub>2</sub>-Emission für die nationale THG-Gesamtsumme bewertet wird, würde BECCS aus Anbaubiomasse in der Perspektive der THG-Inventare für das Jahr der Abscheidung als **Netto-Senke** erscheinen. Etwaige **weitere THG-Emissionen der Wertschöpfungskette** z.B. aus indirekten Landnutzungseffekten durch Erweiterung von Flächen zur Produktion von Lebensmitteln oder Futtermitteln an anderem Ort, aus der Produktion und Anwendung von Düngemitteln, aus der Verarbeitung der Anbaubiomasse zu Biobrennstoffen, dem Transport der Produkte oder des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> und/oder aus der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung würden allerdings in den jeweiligen Inventarkategorien als Brutto-Emissionen mitberichtet werden und müssten für eine umfassende Bewertung der Wertschöpfungskette mitberücksichtigt werden.

THG-Inventare sind auf **anthropogene Emissionen und Einbindungen** beschränkt und die Bilanzierung erfolgt nach dem **Territorialprinzip** und umfasst Emissionen und Entnahmen auf dem Hoheitsgebiet des jeweiligen Staates<sup>2</sup>. Einbindungen und Emissionen auf nicht von menschlicher Aktivität beeinflussten Landflächen können deshalb aus den Inventaren herausgenommen werden und die Einbindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in Ozeanen wird beispielsweise nicht berichtet.

Die Bilanzierung in Inventaren findet grundsätzlich **getrennt pro Kalenderjahr** statt. **Teilprozesse** von Prozessketten können im Inventar **in verschiedenen Jahren** als Brutto-Emissionen bzw. Brutto-Entnahmen bilanziert werden. Im Beispiel einer Kurzumtriebsplantage zur energetischen Nutzung wird für jedes Jahr der Anwachsphase die im jeweiligen Jahr neu aus der Atmosphäre gebundene CO<sub>2</sub>-Menge als CO<sub>2</sub>-Entnahme berichtet, während für das Jahr der Ernte und energetischen Nutzung (=Verbrennung) die komplette geerntete Biomasse als CO<sub>2</sub>-Emission berichtet wird. Die **Permanenz** der Einbindung von aus der Atmosphäre entnommenem CO<sub>2</sub> **wird in Inventaren nicht betrachtet**. Ein mögliches zukünftiges Entweichen von CO<sub>2</sub> aus Produkten/Lagerstätten in die Atmosphäre müsste im Jahr einer solchen Emission für die Quellkategorie berichtet werden, der diese Emission zuzuordnen ist.

### Bilanzierung der Einbindung von CO<sub>2</sub> in kurzlebige Produkte

Eine **Ausnahme** vom Prinzip, die Permanenz der Kohlenstoffbindung durch separates Berichten von Einbindungen und Freisetzungen in den jeweiligen Jahren abzubilden, gilt für **kurzlebige kohlenstoffhaltige Produkte**, wenn die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus diesen Produkten in keiner Quellkategorie des Inventars berücksichtigt wird. Da zum Beispiel die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus

<sup>2</sup> Für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr gelten spezielle Regeln, hier wird für das Land berichtet, in dem der jeweilige Treibstoff zuletzt verkauft wird.

kohlensäurehaltigen Getränken nicht im Inventar bilanziert wird, wird auch die Einbindung von CO<sub>2</sub> zu diesem Zweck nicht berücksichtigt.

Im Kontext kurzlebiger kohlenstoffhaltiger Produkte in den THG-Inventaren ist zudem von Relevanz, dass es noch **keine internationale Übereinkunft** unter IPCC und UNFCCC gibt wie die Emissionen aus der Verbrennung **synthetischer Brennstoffe (E-Fuels)** zu berichten ist, die in Zukunft unter Nutzung von aus Abgasen rückgewonnenem CO<sub>2</sub> (kurzlebiges fossiles CCU oder BECCU) oder von aus der Atmosphäre abgedehntem CO<sub>2</sub> (kurzlebiges DACCU) hergestellt werden könnten. Denkbar ist, dass entweder

- sowohl die Einbindung von CO<sub>2</sub> in den synthetischen Brennstoff als CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung (fossiles CCU, BECCU) bzw. CO<sub>2</sub>-Entnahme (DACCU) als auch die Freisetzung von CO<sub>2</sub> bei dessen Verbrennung als CO<sub>2</sub>-Emission berichtet wird oder
- weder die Einbindung noch die Freisetzung als Rückgewinnung/Entnahme bzw. Emission berichtet werden.

Falls sich E-Fuels zukünftig in relevanten Mengen durchsetzen sollten, hätte die ausstehende Berichterstattungskonvention einen bedeutenden **Einfluss** einerseits auf die Netto-Emissionen/Netto-Einbindungen pro Inventarkategorie und andererseits bei internationalem Handel von E-Fuels auf die gesamten **Netto-Emissionen des Produktionslandes bzw. des Verbrauchslandes**.

## 2.3 Vergleichbarkeit von zertifizierten CO<sub>2</sub>-Entnahmen mit CO<sub>2</sub>-Entnahmen in THG-Inventaren

In der Praxis der Inventarerstellung finden insbesondere in der Landnutzungskategorie (LULUCF) regelmäßig Berechnungsmethoden zur Bestimmung von Brutto-Emissionen und Brutto-Entnahmen auf der gesamten Landfläche eines Staates Anwendung, die weniger granular und genau sind als Methoden, die für projektbasierte Bilanzierung praktikabel sind, weniger Messwerte nutzen und mehr auf gemittelten Literaturwerten beruhen.

In Zertifizierungssystemen quantifizierte Netto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen sind deshalb nur in Ausnahmefällen quantitativ als Brutto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen in den THG-Inventaren wiederzufinden. Dies hängt im Einzelfall von der Komplexität der für zertifizierte Entnahmen berücksichtigten Prozessketten, von dem bei der Zertifizierung betrachteten Zeitintervall und von der Granularität der verwendeten Inventarmethoden ab (Tier 1- Tier 3 gemäß IPCC-Guidelines). Sofern bei der Zertifizierung auch Daten zu Brutto-Emissionen und Brutto-Entnahmen einzelner Prozessschritte erhoben werden, könnten solche Daten perspektivisch auch für die Erstellung von THG-Inventaren genutzt werden, zum Beispiel für Inventarkategorien, für die es noch keine etablierten Datenquellen gibt (z.B. direkt CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zur geologischen Speicherung oder zur Einbindung in langlebige Produkte – DACCS / DACCU) oder durch die Verbreiterung der Datenbasis an Messwerten zur Ableitung von inventartauglichen Berechnungsfaktoren für Brutto-Emissionen oder Brutto-Entnahmen einzelner Kohlenstoffpools im Landnutzungssektor.

## 2.4 Schlussfolgerung für die vorliegende Analyse

Für die Diskussion der Definition von Senkenzielen ist es von hoher Relevanz zu unterscheiden, ob

- das **Senkenziel komplementär zu einem parallelen Emissionsminderungsziel** gelten soll und somit eine Doppelzählung einer physischen CO<sub>2</sub>-Entnahme in sowohl dem Senkenziel als auch dem Emissionsminderungsziel vermieden werden muss oder

- das **Senkenziele einem übergeordneten Emissionsminderungsziel untergeordnet** ist und somit eine Doppelzählung einer physischen CO<sub>2</sub>-Entnahme sowohl im Senkenziel als auch im übergeordneten Emissionsminderungsziel unschädlich ist.

Für das durch Senkenziele ggf. zu ergänzende Emissionsminderungsziel gehen wir davon aus, dass dieses wie für Deutschland und die EU etabliert inventarbasiert ist, d.h. die Zielerreichung durch die Netto-Emissionen bzw. Netto-Entnahme definierter Inventarkategorien gemessen wird, bei einem relativen Ziel durch den Vergleich von Emissionen/Einbindungen in Basisjahr(en) und Zieljahre(en) oder bei einem absoluten Zielen durch Betrachtung der Zieljahre allein.

Für ein **komplementär angelegtes Senkenziel** müsste dessen Definition ebenfalls **inventarbasiert** sein und durch sorgfältige Definition und Abstimmung der in Senkenziel(en) und Emissionsminderungsziel(en) zu betrachtenden Inventarkategorien kann sichergestellt werden, dass **keine Doppelzählungen** möglich sind. In diesem Fall muss deshalb der **Ansatz der THG-Inventare zur Quantifizierung von (Brutto-) CO<sub>2</sub>-Entnahmen durch Senken** berücksichtigt werden, ggf. inklusive der Rückgewinnung und Abscheidung von biogenem CO<sub>2</sub> und **ohne Kriterien für Permanenz und Zusätzlichkeit**.<sup>3</sup> Um Fehlanreize zu vermeiden, sollte für die Definition von Inventarkategorien für inventarbasierte Senkenzielen und die Festsetzung der Zielambition trotzdem im Sinne von Zertifizierungssystemen der Netto-Nutzen derjenigen Prozessketten berücksichtigt werden, deren Einzelschritte in den gewählten Inventarkategorien zumindest teilweise als CO<sub>2</sub>-Entnahmen oder CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung berichtet werden.<sup>4</sup>

Für ein **untergeordnet angelegtes Senkenziel** gelten die für ein komplementäres Senkenziel genannten Einschränkungen nicht, sondern dies könnte **frei nach pragmatischen Kriterien definiert** werden, zum Beispiel über die Menge von Netto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen, die nach zu bestimmenden Kriterien in zu bestimmenden Zeiträumen zertifiziert werden sollen, ggf. differenziert nach verschiedenen Kategorien von Zertifikaten, z.B. im Sinne von ‚natürlichen‘ oder ‚technischen‘ Senken. Für untergeordnete Senkenziele sind allerdings auch inventarbasierte Definitionen möglich, wobei Doppelzählungen zu inventarbasierten Minderungszielen unschädlich sind.

Zertifikatsbasierte Förderinstrumente zur physischen Umsetzung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen würden auch ohne eine explizite Zielsetzung zur Menge der angestrebten zertifizierten Netto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen zur Erreichung von inventarbasierten Senkenzielen und/oder umfassend über das komplette Inventar definierten Emissionsminderungszielen beitragen, allerdings könnte dieser Beitrag im Inventar nicht exakt quantifiziert werden.

### 3 Überblick über verschiedene Optionen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme

In Öko-Institut (2023) wurde eine Reihe von Prozessen / Prozessketten im Kontext von CO<sub>2</sub>-Entnahme zusammengestellt, wobei deren Einordnung als Senken, auch angesichts der in Kapitel 2 diskutierten verschiedenen Betrachtungsansätze, im Einzelfall umstritten ist (Smith et al. 2023; IPCC 2022):

- **Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage (DACCS):** Kohlenstoff wird durch chemische Prozesse (feste Sorptionsmittel oder flüssige Lösungsmittel) aus der Atmosphäre in

<sup>3</sup> Eine etwaige Einführung zertifikatsbasierter Senkenziele auf nationaler oder EU-Ebene würde zwangsläufig zu Doppelzählungen mit den Inventaren führen, deren Quantifizierbarkeit von der oben angesprochenen Inventarsichtbarkeit der zertifizierten Entnahmen abhängt.

<sup>4</sup> Bei der Definition von Inventarkategorien ist außerdem die bisher noch ungeklärte Behandlung von Produktion und Verbrennung von synthetischen Brennstoffen (E-Fuels) in den Inventaren zu beachten, vgl. Box in Kapitel 2.2.

einen konzentrierten CO<sub>2</sub>-Strom abgeschieden, der dann in geologischen Formationen gespeichert wird. Wird das abgeschiedene CO<sub>2</sub> in Produkten verwendet, spricht man von „direct air carbon capture and utilisation“ (DACCU).

- **Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS):** CO<sub>2</sub> wird der Atmosphäre durch das Wachstum von Biomasse entzogen. Die Biomasse wird dann zur Energieerzeugung genutzt und das CO<sub>2</sub> aus einer Bioenergieanlage in einem konzentrierten CO<sub>2</sub> Strom abgeschieden, der dann in geologischen Formationen gespeichert wird. Neben CO<sub>2</sub> aus der energetischen Nutzung von Biomasse kann auch CO<sub>2</sub> aus der Fermentierung (stoffliche Nutzung) von Biomasse für BECCS-Prozesse genutzt werden. Das CO<sub>2</sub> kann auch in Produkten genutzt werden (BECCU).
- **Wachstum und Nutzung von Biomasse:** CO<sub>2</sub> wird der Atmosphäre durch das Wachstum von Biomasse entzogen. Die Biomasse wird dann für verschiedene Zwecke genutzt:
  - Biobasierte Produkte speichern den während des Biomasse-Wachstums aufgenommenen Kohlenstoff, solange das Produkt nicht verbrannt oder zersetzt wird. Im Falle Holz, das aus Wäldern geerntet und für Produkte wie Bauholz, Möbel, Paneele, Papier und papierähnliche Produkte verwendet wird, spricht man von Holzprodukten (englisch: Harvested Wood Products / HWP).
  - Pflanzenkohle umfasst die Verkohlung von Biomasse unter Sauerstoffabschluss, deren Produkt als ‚Pflanzenkohle‘ in Böden eingebracht wird und so dort den vorher in die Biomasse aufgenommenen Kohlenstoff speichert.
- **Stärkung natürlicher Kohlenstoffsinken**, dazu zählen:
  - Aufforstung/Wiederaufforstung,
  - Verbesserte Waldbewirtschaftung,
  - Einbindung von Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden (Carbon Farming),
  - Agroforstwirtschaft,
  - Blue Carbon (umfasst biologisch getriebene Kohlenstoffflüsse- und Speicherung in Vegetationsküstenökosystemen)
  - Wiederherstellung von Mooren und Feuchtgebieten.
- **Verstärkte Verwitterung:** entfernt CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch die Verwitterung von Silikat- und Karbonatgestein, das in kleine Partikel zerbrochen und auf Böden, Küsten oder Ozeane aufgebracht wird. Es ist auch möglich, Bauschutt und Abfallstoffe aus dem Bergbau als Ressourcen für die verstärkte Verwitterung zu nutzen (Babiker et al. 2022).
- **Ozeandüngung:** Erhöhung der Verfügbarkeit von Makronährstoffen (Stickstoff, Phosphor) oder Mikronährstoffen im Meer, um die CO<sub>2</sub> - Aufnahme durch das Wachstum des Phytoplanktons zu verbessern oder die Fischbestände zu vergrößern. Die Eisendüngung ist die bisher am besten untersuchte Option dieser Entnahmeoption.
- **Alkalisierung der Ozeane:** Alkalische Materialien wie Silikat- oder Karbonatgestein werden dem Ozean zugeführt, so dass der Kohlenstoff in Mineralien oder als Biokarbonat gespeichert wird.
- **Künstlicher Auftrieb:** Nährstoffreiches Tiefenwasser wird nach oben gepumpt und düngt die oberen Meeresschichten und Algen, so dass mehr CO<sub>2</sub> in der Biomasse gespeichert wird (SWP 2023).

## 4 Typologisierung von Senken als ‚natürlich‘ bzw. ‚technisch‘ in der Literatur

Die in der Literatur vorliegenden Ansätze zur Typologisierung von Senken / CO<sub>2</sub>- Entnahmetätigkeiten<sup>5</sup> orientieren sich größtenteils am Verständnis von Senken im Sinne von Prozessketten und Zertifizierungssystemen.

Smith et al. (2023) verwenden die Bezeichnung "konventionelle CO<sub>2</sub>-Entnahme"(englisch: ‚conventional carbon dioxide removal – conventional CDR‘) für CO<sub>2</sub>-Entnahmetätigkeiten auf Flächen, die naturbasiert sind, einschließlich Aufforstung, Wiederaufforstung und Bewirtschaftung bestehender Wälder. "Neuartige" Entnahmetätigkeiten beziehen sich auf solche, die sich auf den Einsatz von Technologien zur Schaffung einer Kohlenstoffsenken stützen, einschließlich BECCS, DACCS und beschleunigte Gesteinsverwitterung (Smith et al. 2023). Die Unterscheidung zwischen "natürlichen" und "technologischen" bzw. „technischen“ Entnahmetätigkeiten ist nicht immer offensichtlich, sondern unterliegt vielmehr der menschlichen Entscheidung und Wahrnehmung (Bellamy und Osaka 2020). Minx et al. (2018) definieren "Technologie" im weiten Sinne als Mittel zur Erzielung eines Minderungseffekts und schließen damit z. B. auch Aufforstung und Wiederaufforstung sowie die Kohlenstoffbindung im Boden ein.

In der Inventarperspektive bietet es sich an ‚natürliche‘ bzw. ‚technische‘ Senken entlang der Inventarkategorien zu definieren, in denen die entsprechenden Entnahmen bzw. Rückgewinnungen berichtet werden, und z.B. die LULUCF-Kategorie mit ‚natürlichen‘ Senken gleichzusetzen. Dies ist inhaltlich passend, solange man ‚konventionelle‘ Entnahmetätigkeiten im Sinne von Smith et al. (2023) betrachtet. Für ‚neuartige‘ Entnahmetätigkeiten stößt dieses Konzept allerdings schnell an Grenzen, z.B. weil BECCS aus mehreren Teilprozessen besteht, die im Inventar teils unter LULUCF und teils in anderen Kategorien<sup>6</sup> berichtet werden. Entnahmooptionen wie Produktion und Ausbringung von Pflanzenkohle, mit eindeutig ‚technischem‘ Prozessschritt in der Verkohlung der Biomasse, wird gemäß IPCC-Richtlinien ebenfalls in der LULUCF-Kategorie berichtet und wäre nach dieser Typologisierung als ‚natürlich‘ einsortiert. Für weitere Entnahmooptionen wie beschleunigte Verwitterung gibt es zudem noch keine Konvention für die Verortung in der Inventarberichterstattung.

CO<sub>2</sub>-Entnahme (englisch Carbon Dioxide Removal, CDR) ist in vielen Quellen als CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre und anschließender Speicherung definiert und wird in einigen Quellen explizit mit anthropogenem Handeln in Bezug gestellt (IPCC 2023; BMWK 2022; ESABCC 2023; Prognos 2021; Smith et al. 2023). Häufig wird CDR mit dem Begriff Negativemissionstechnologien gleichgesetzt (Climate Analytics 2022; BMWK 2022; Lenton 2014; Prognos 2021). In ESABCC (2023), EC (2021) und Strategic Perspectives (2023) wird eine Unterteilung in natürliche und technische Senken angegeben. Diese Unterteilung wird auch in vielen Szenarienrechnungen zur Einhaltung des CO<sub>2</sub>-Budgets vorgenommen und die Angabe der Negativemissionen in diesen beiden Kategorien angegeben.

Eine Definition von technischen und natürlichen Senken ist in der untersuchten Literatur jedoch selten vorhanden<sup>7</sup>. Sie beschränken sich zumeist eher auf die Angabe von Verfahren, die zu der jeweiligen Variante gezählt wird. BMWK (2022) und New Climate Institute (2020) beschreiben technische Senken als Methodiken zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit Technologien. Als Optionen für technische Senken gelten DACCS, häufig auch BECCS und teilweise Pflanzenkohle, beschleunigte

<sup>5</sup> Siehe dazu auch die aktuelle Übersicht in Öko-Institut (2023).

<sup>6</sup> z.B. Inventarkategorie 1A ‚Energie – Verbrennung von Brennstoffen‘ bei energetischer Nutzung der Biomasse, der Kohlenstoff rückgewonnen wird oder Inventarkategorie 2 ‚Industrieprozesse und Produktnutzung‘ bei stofflicher Nutzung der Biomasse

<sup>7</sup> Dies ist in der Tabelle 2 im Anhang durch große Lücken erkennbar.

Verwitterung und Ozeandüngung. Natürliche Senken werden in New Climate Institute (2020) als CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch Fotosynthese in Pflanzen und eine anschließende Speicherung in Biomasse definiert. Eine ähnliche Definition gibt BMWK (2022) an und beschreibt es als Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes und der Fähigkeit von Ökosystemen CO<sub>2</sub> zu entnehmen und zu speichern. Von Climate Analytics (2022) wird außerdem angemerkt, dass natürliche Senken keine Garantie für eine permanente Speicherung liefern. In den betrachteten Studien werden Aufforstung, Wiederaufforstung und Eindämmung der Entwaldung, Pflanzenkohle, BECCS, Bodenmanagement, Wiederherstellung von Ökosystemen, Ozeandüngung und Beschleunigte Verwitterung, als Optionen für natürliche Speicherung angesehen. Dabei ist offensichtlich, dass einige Optionen, insbesondere BECCS, Pflanzenkohle und Beschleunigung natürlicher Prozesse, in den verschiedenen Literaturquellen zu unterschiedlichen Senken (natürlich/technisch) gezählt werden. Dies zeigt, dass die Kriterien zur Unterteilung noch nicht einheitlich sind und keine eindeutige Definition zur Differenzierung vorliegt. In der Kontinuität der Abgrenzung ‚natürlich‘ vs. ‚technisch‘ stehen die Begrifflichkeiten ‚engineered‘ (deutsch in etwa: ‚technisch ausgeführt‘ oder ‚konstruiert‘) (Günther und Ekardt 2023) bzw. ‚industriell‘ (ICF 2023), mit denen jeweils BECCS und DACCs gemeint ist.

Smith et al. (2023) gehen auf die Unterscheidung von Entnahme und Speicherung ein, die jeweils in drei Kategorien unterteilt werden: Die Entnahme kann demnach biologisch (Fotosynthese), geochemisch (mineralische Bindung) oder chemisch (durch Solventen und Absorber) erfolgen, während die Speicherung in die Kategorien ‚biologisch‘ (am Land oder maritim), ‚geochemisch‘ (in geologischen Formationen)<sup>8</sup> oder ‚in langlebigen Produkten‘ (z.B. Pflanzenkohle, Baumaterial) unterteilt wird.

Tabelle 1 im Anhang enthält einen Überblick über die zur Fragestellung der Abgrenzung von ‚natürlichen‘ und ‚technischen‘ Senken ausgewerteten Quellen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 2 im Anhang zusammengefasst.

## 5 Alternative Ansätze zur Typologisierung von Senken

CO<sub>2</sub>-Entnahmetätigkeiten wurden bereits in einer Reihe von wissenschaftlichen Studien kategorisiert und bewertet. Sie unterscheiden sich im Prozess der CO<sub>2</sub>-Abtrennung sowie nach Speicherorten, was zu unterschiedlich lang geschätzten Speicherdauern führen kann. Außerdem können die Aktivitäten sehr komplex sein, zum einen hinsichtlich der beteiligten Prozesse und zum anderen auch des notwendigen Energie- und Ressourceneinsatzes und damit der potenziellen Emissionen entlang der Prozesskette. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist das absolute CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial, das von der Effizienz der Entnahme, aber auch von den Entnahme- und Speicherkapazitäten der jeweiligen Aktivität abhängt. Einflussfaktoren für das Potenzial sind auch die technologische Bereitschaft und Skalierbarkeit sowie die Kosten, die sich zwischen den Entnahmetätigkeiten erheblich unterscheiden. Zudem variieren auch die Umweltauswirkungen der anwendbaren Maßnahmen. Es ist ebenfalls zu beachten, dass verschiedene Entnahmetätigkeiten um Ressourcen wie verfügbare Flächen, Biomasse oder erneuerbare Energien konkurrieren können.

In einem im Sommer 2023 vom Umweltbundesamt veröffentlichten Factsheet (Öko-Institut 2023) wurden bereits die wichtigsten Aspekte von CO<sub>2</sub>-Entnahmetätigkeiten herausgearbeitet, die für die Entwicklung einer Typologie nützlich sind und dabei helfen Knackpunkte für den Einsatz von CO<sub>2</sub>-

---

<sup>8</sup> In Ajayi et al. (2019) wird für die Speicherung in geologischen Formationen zwischen ‚physikalischen‘ und ‚geochemischen‘ Mechanismen unterschieden.

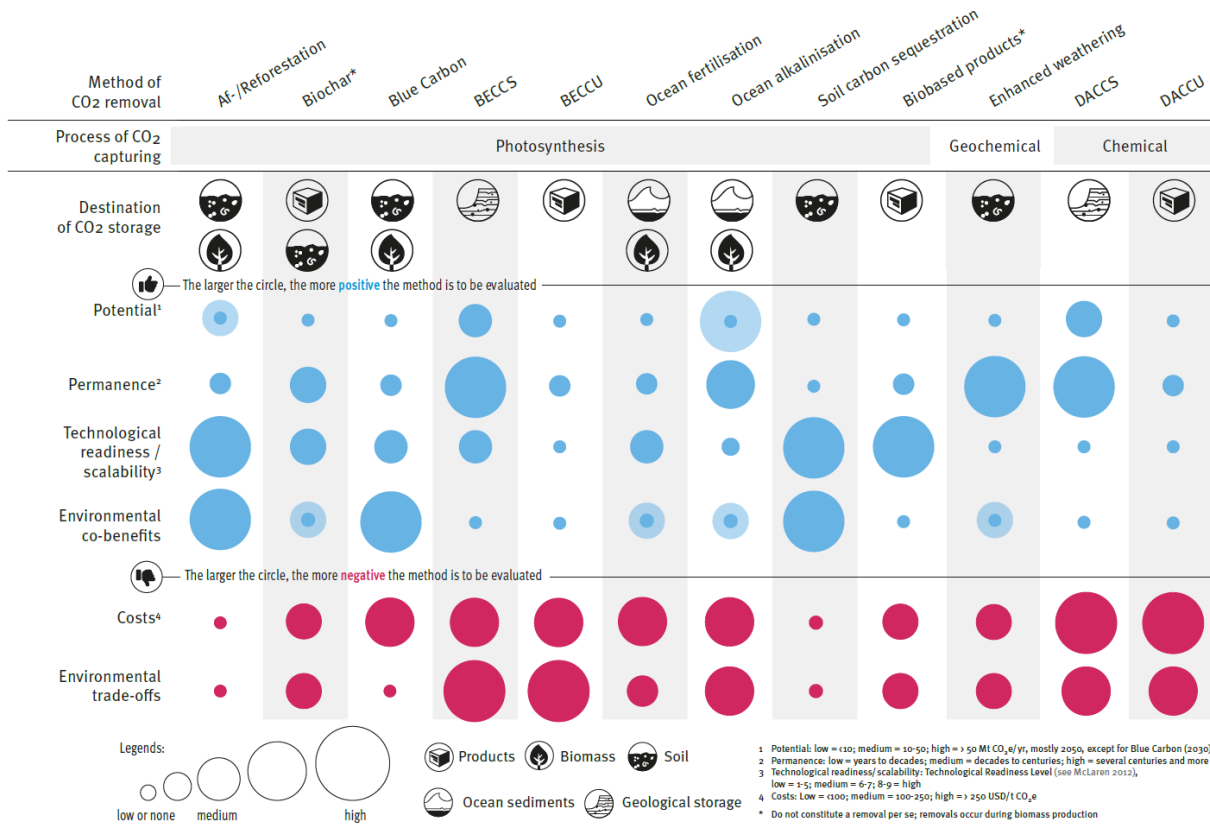
Entnahmetätigkeiten zu identifizieren. Die dort herausgearbeiteten Kriterien zur Unterscheidung und Typologisierung von Entnahmetätigkeiten umfassen:

- Prozesse zur Entnahme von CO<sub>2</sub>:  
z.B. Photosynthese, geochemische, chemische oder mechanische Prozesse
- Ort der Speicherung von Kohlenstoff bzw. CO<sub>2</sub> nach der Entnahme:  
z.B. geologische Speicherung in Lithosphäre oder biologische Speicherung in terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs.
- Permanenz der sich an die Entnahme anschließenden CO<sub>2</sub>-Speicherung:  
z.B. Pflanzenkohle kann Kohlenstoff für Jahrtausende speichern, Holzprodukte im Baugewerbe können je nachdem Kohlenstoff Jahrzehnte bis zu Jahrhunderten speichern.
- Energieverbrauch und Emissionen während des Entnahmeprozesses:  
z.B. hoher Energieverbrauch beim Mahlen des Gesteins für die beschleunigte Verwitterung (Fuss et al. 2018), einen geringen Energiebedarf hat dem gegenüber die Wiederaufforstung.
- CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial:  
IPCC hat verschiedene Entnahmeoptionen hinsichtlich ihrer globalen Entnahmepotenziale bewertet, z.B. DACCS mit 5-40 Gt CO<sub>2</sub>e pro Jahr bis 2050 oder Agroforstwirtschaft mit 0,3-9,4 Gt CO<sub>2</sub>e pro Jahr bis 2050 (Babiker et al. 2022).
- Umweltauswirkungen:  
Entnahmetätigkeiten können diverse soziale und ökologische Co-Benefits auslösen aber auch negative Auswirkungen und Risiken mit sich bringen (siehe z.B. Minx et al. 2018; Fuss et al. 2018; Babiker et al. 2022; Griscom et al.; Seddon et al. 2020). So kann z.B. Kohlenstoffbindung im Boden die Bodenqualität verbessern, BECCS könnte durch Anbau von Monokulturen Biodiversitätsverluste und die Minderung der Bodenqualität verstärken.
- Technologische Umsetzbarkeit und Skalierbarkeit:  
z.B. für DACCS sind die Technologien noch nicht in einem Entwicklungsstadium, welches die Anwendung in der Breite erlaubt (Babiker et al. 2022), andere Entnahmetätigkeiten, die CO<sub>2</sub> über Photosynthese aufnehmen und in Biomasse speichern sind direkt umsetzbar, aber die Skalierbarkeit hängt stark von der Flächenverfügbarkeit ab.
- Kosten:  
Je nach Entnahmeoptionen werden in der Literatur verschieden breite Intervall für Kostenschätzungen pro t CO<sub>2</sub> genannt (siehe Zusammenfassung in Öko-Institut 2023), bei neuartigen Entnahmetechnologien wie DACCS gibt es laut (Smith et al. 2023) angesichts der frühen Entwicklungsphase der Technologie noch keine Marktpreise.

## 6 Einordnung einzelner Entnahme- und Speicheraktivitäten in verschiedenen Typologisierungsansätzen

Abbildung 1 zeigt eine aus Öko-Institut (2023) übernommene Übersicht in englischer Sprache zu verschiedenen Entnahmeoptionen diskutierten Aktivitäten und deren Einordnung im Bezug zu ausgewählten Typologisierungsansätzen.

**Abbildung 6-1: Übersicht über die wesentlichen CO<sub>2</sub>-Entnahmeaktivitäten und deren Schlüsseigenschaften**



Quelle: Öko-Institut (2023)

Wie in dieser Analyse diskutiert, können die ‚konventionellen‘ CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden, welche die (temporäre) Speicherung von Kohlenstoff in Biomasse oder Böden vergrößern, eindeutig und unumstritten als ‚natürliche‘ Entnahmemethoden eingeordnet werden. Eine Qualifizierung als ‚Senke‘ bzw. ‚Negativemission‘ ist dabei vom Kontext der Betrachtung abhängig (Zertifikat/Prozesskette/längeres Zeitintegral ggü. THG-Inventar/Teilprozesse/jährliche Betrachtung): für die Einordnung von neuartigen CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden ist eine klare Trennung von natürlichen und technischen Verfahren nicht immer eindeutig möglich, insbesondere wenn in der Prozesskette neben biologischen/biochemischen Prozessschritten wie Photosynthese auch in technischen Aggregaten stattfindende Prozessschritte wie Verkohlung, Verbrennung und/oder CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung aus Abgasen enthalten sind (z.B. Pflanzenkohle und BECCS).

## 7 Schlussfolgerungen zur Abbildung von ‚natürlichen‘ und ‚technischen‘ Senken in Klimazielen

### 7.1 Allgemeine Schlussfolgerungen zu ggf. differenzierten Senken in der Zielarchitektur

Die **Rahmenbedingungen für Abgrenzung von Senken** für Klimaziele sind stark **abhängig vom Kontext der diskutierten Zielsetzung**, der Zielarchitektur. Für **komplementär zu Emissionsminderungszielen angelegte Senkenziele** (etwa im Sinne der Sektorziele im KSG) gelten deshalb andere Einschränkungen als für **untergeordnete Ziele**.



Der angestrebte **Nutzen von** zwischen verschiedenen Senkenoptionen **differenzierenden Zielen** besteht im Wesentlichen darin, **Leitplanken** zu setzen für die Entwicklung von gezielten Instrumenten, welche unter Berücksichtigung spezifischer Rahmenbedingungen<sup>9</sup> die Realisierung von entsprechenden CO<sub>2</sub>-Entnahmen anreizen sollen. Zusätzlich sind differenzierende Ziele von hohem **kommunikativem Wert** für einzubindende privatwirtschaftliche Akteur\*innen.

**Vor einer ‚technischen‘-Definition** von ggf. differenzierten Senkenzielen, die festlegt, wie die Zielerreichung bzw. der Fortschritt dorthin gemessen werden soll, sollte eine Analyse / eine **Strategie** stehen, **welche Senkenoptionen** überhaupt in welchem Maße **angereizt werden sollen**. Hierzu sind einerseits **Szenarioanalysen** inklusive Kostenbetrachtungen hilfreich, welche den Bedarf an CO<sub>2</sub>-Entnahmen zur Erreichung von Netto-THG-Neutralität quantifizieren. Andererseits sind Analysen zur **Umweltintegrität** von mit CO<sub>2</sub>-Entnahmen verbundenen **Prozessketten** wichtig, um die Gefahr von Fehlanreizen frühzeitig erkennen zu können. Zur Analyse der Umweltintegrität ist dabei der Senkenbegriff im Kontext von CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikaten zu bevorzugen, weil nur eine sorgfältige Analyse von kompletten Prozessketten und der Vergleich mit adäquat gewählten Referenzfällen/Baselines die ‚ökologische Wahrheit‘ über CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen ermitteln kann.

Im Kontext von CO<sub>2</sub>-Entnahmen muss eine solche Betrachtung der **Umweltintegrität** von Prozessketten zwangsläufig auch die Dauer/**Permanenz** der sich an die Entnahme anschließenden **CO<sub>2</sub>-Speicherung** bzw. Zwischenspeicherung einschließen und somit **lange Zeitintervalle** von (mindestens) Jahrzehnten umfassen, um so auch die Zeiträume nachhaltiger Waldbewirtschaftung zu berücksichtigen. Für ein Gesamtbild der Bewertung von Entnahmeoptionen muss allerdings **zusätzlich** die **Perspektive** auf die **jährlichen Emissions- bzw. Entnahmebilanzen der THG-Inventare** in definierten Kalenderjahren gerichtet werden, weil nur in der Inventarperspektive ermittelt werden kann, welchen **Beitrag** die Entnahmeoptionen zu übergeordneten, für konkrete Stichjahre bzw. Perioden definierten **Emissionsminderungs- bzw. Neutralitätszielen** in den kommenden Dekaden liefern könnten.

Vor dem Hintergrund einer durch solche Analysen gespeisten Strategieentwicklung können differenzierte Senkenziele hilfreich sein, kommunikativ und instrumentell den Fokus auf angestrebte Senkenoptionen zu richten. Das **Risiko bei differenzierter Zielausweisung** liegt in der Gefahr von Mängeln in der ökonomischen Effizienz oder ökologischen Effektivität, da in die Zukunft schauende Analysen zur Quantifizierung der (Teil-)Ziele nicht notwendigerweise alle technischen, ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Parameter so erfassen können, wie sie sich im Verlauf der Zielerreichungsperiode einstellen werden.

## 7.2 Natürliche / technische Senken in inventarbasierten Zielen

**‚Natürliche‘ Senken** im Sinne von **‚konventionellen‘ CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden** (vgl. Smith et al. (2023)) sind in den THG-Inventaren gut **innerhalb der LULUCF-Kategorie** identifizierbar. Hierbei ist zu beachten, dass die in der LULUCF-Kategorie der Inventare bilanzierten Netto-Entnahmen (bzw. ggf. Netto-Emissionen) sich zusammensetzen aus einer Vielzahl einzelner Brutto-Emissionen (z.B. aus trockengelegten Moorböden) und Brutto-Einbindungen (z.B. dem Zuwachs von Biomasse in Wäldern). Für eine gezielte Adressierung von ‚natürlichen‘ Senkenbeiträgen wäre es deshalb hilfreich, Ziele für ‚konventionelle natürliche‘ CO<sub>2</sub>-Entnahme nicht auf den Netto-Beitrag der gesamten LULUCF-Kategorie zu definieren, sondern auf **ausgewählte im LULUCF-Inventar berichtete Kohlenstoffpools in spezifischen Unterkategorien**. So ein Ansatz würde es auch ermöglichen, ‚konventionelle natürliche‘ Senken zu differenzieren zu ebenfalls in der LULUCF-

<sup>9</sup> z.B. Technologiereife, spezifische Kosten, Struktur der für die Umsetzung zu involvierenden Akteur\*innen etc.

Kategorie berichteten CO<sub>2</sub>-Einbindungen in ausgebrachter Pflanzenkohle, deren Prozesskette ja eine Kombination aus ‚natürlichen‘ und ‚technischen‘ Prozessschritten umfasst.

Für einige ‚**neuartige**‘ und eindeutig ‚**technische**‘ **Entnahmemethoden** (DACCS, beschleunigte Verwitterung) gibt es noch **keine international vereinbarte Konvention**, wie genau im Inventar solche Entnahmen zu berichten sind. Als nächstliegende Option erscheint momentan die bisher nicht weiter definierte Inventarkategorie 6 „Sonstige Emissionen und Entnahmen“. Gleichzeitig gibt es aber noch keine internationale Übereinkunft ob ggf. auch CO<sub>2</sub>-Einbindungen in **kurzlebige Produkte** (z.B. **Herstellung von E-Fuels mit DAC als Kohlenstoffquelle**) in dieser Kategorie berichtet werden sollten. Das Fehlen dieser Konventionen macht es momentan daher schwierig, die zukünftige Abbildung solcher Entnahmemethoden in den standardisierten Berichtstabellen der THG-Inventare für eine exakte Zieldefinition zu referenzieren.

Die Rückgewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Biomasseverbrennung (als Teilschritt der **BECCS**-Prozesskette) ist **in den THG-Inventaren** gut **identifizierbar**. Allerdings ist auch hier noch ungeklärt, ob in den Berichtstabellen neben der Rückgewinnung zur geologischen Speicherung im selben Berichtselement auch die Rückgewinnung für kurzlebige Produkte (z.B. Herstellung von E-Fuels) eingeschlossen werden wird.

Für die **inventarmäßige Definition von Zielen für ‚neuartige‘ CO<sub>2</sub>-Senken** (bzw. ausgewählte Entnahme- bzw. Rückgewinnungs-(Teil-)Prozesse solcher Prozessketten) müssten deshalb Verbaldefinitionen gewählt werden, die **jenseits der Detailtiefe der international standardisierten Berichtstabellen** liegen und für das Monitoring müssten deshalb die inventarerstellenden Stellen (in Deutschland: das Umweltbundesamt) veranlasst werden entsprechende **Zusatzauswertungen** vorzulegen, die zu den international standardisierten Inventartabellen konsistent sind.

#### **Einordnung von Senkenzielen gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) bzw. Änderungsentwurf vom Juni 2023**

Beim ‚Beitrag des LULUCF-Sektors‘ gemäß KSG §3a handelt es sich um ein Netto-Senken-Ziel für die Inventarkategorie LULUCF welches komplementär zu den Emissionsminderungszielen für die ‚Emissions‘-Sektoren gemäß Nr. 1-6 in Anlage 1 des KSG: Dieses Senkenziel beruht auf dem Senkenbegriff der Inventare (Betrachtung eines spezifischen Kalenderjahres ohne Permanenz- und Zusätzlichkeitskriterien) und beinhaltet Bruttoemissionen (z.B. aus trockengelegten organischen Böden) welche durch Bruttosenkungen (im wesentlichen Netto-Biomassezuwachs in Wäldern) überkompensiert werden sollen.

Beim ‚Beitrag technischer Senken‘, wie er im KSG-Entwurf vom Juni 2023 in §3b vorgesehen ist, würde es sich um ein den Sektorzielen nach KSG (inklusive Beitrag des LULUCF-Sektor gemäß §3a) untergeordnetes Ziel handeln. Sämtliche im THG-Inventar berichteten THG-Emissionen, inklusive von (Brutto-) CO<sub>2</sub>-Entnahmen und CO<sub>2</sub>-Rückgewinnungen sind vollständig und eindeutig den in KSG Anlage 1 definierten Sektoren zugeordnet. Eine Definition der ‚technischen Senken‘ gemäß §3b liegt noch nicht vor und wäre für die ausstehende Rechtsverordnung nach §3b zu erwarten. Inventarmäßige Doppelzählungen des Beitrages technischer Senken zu den Beiträgen der KSG-Sektoren gemäß KSG Anlage 1 wären unvermeidlich, aber wie diskutiert für die Integrität der Zielsetzungen nicht schädlich.

### **7.3 Natürliche / technische Senken in zertifikatsbasierten Zielen**

Für **untergeordnet angelegte Senkenziele** muss **kein Bezug auf THG-Inventare** genommen werden. Hier würde es sich anbieten **Zielgrößen für Senkenbeiträge** anhand **zertifizierter Netto-CO<sub>2</sub>-Entnahmen** in standardisierter **Zertifikatskategorien** zu definieren, wie sie zum Beispiel voraussichtlich **unter dem CRCF** entwickelt werden. Voraussetzung für national definierte

zertifikatsbasierte Ziele wäre zudem, dass in den (unter dem CRCF zu entwickelnden) Zertifikaten der **geografische Bezug zum jeweiligen EU-Mitgliedsstaat** transparent wäre.

Der **Vorteil von zertifikatsbasierten Zielen** liegt darin, dass aus eine **aus Umweltintegritätsbetrachtungen abgeleitete Auswahl** verschiedener Optionen von CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden voraussichtlich **auf** verschiedene dann (unter dem CRCF) standardisierte **Zertifikatskategorien übertragen** werden kann. Eine Differenzierung von ‚natürlichen‘ und ‚technischen‘ Senken wäre dann über die Auflistung der jeweils gemeinten Zertifikatskategorien möglich. Auch andere, ggf. über ‚natürlich‘ vs. ‚technisch‘ hinausgehende Differenzierungen von Senkenzielen entlang der Zertifikatskategorien sind denkbar.

Der **Nachteil** von zertifikatsbasierten Senkenzielen liegt darin, dass der **Beitrag der zertifizierten Netto-Entnahmen** zu den im THG-Inventar bilanzierten Brutto-Einbindungen bzw. Brutto-Rückgewinnungen und somit **zu den übergeordneten klimapolitischen Zielgrößen** bis auf Ausnahmefälle **nicht quantifizierbar** sein wird. **Hilfreich** in diesem Kontext wäre es, **wenn in den Zertifikaten zusätzlich zu den zertifizierten Netto- CO<sub>2</sub>-Entnahmen-Beträge** auch die in die Berechnung einfließenden **Brutto-Entnahmen bzw. Brutto-Rückgewinnungen ausgewählter Teilprozesse** ausgewiesen würden, die dann leichter mit den THG-Inventaren vergleichbar wären und ggf. auch für die Erstellung der THG-Inventare genutzt werden könnten.

## Anhang I.

**Tabelle 7-1: Betrachtete Studien zur Definition von technischen und natürlichen Senken**

Titel	Autor	Jahr	Nr
<u>Choices for a more Strategic Europe</u>	Strategic Perspectives	2023	SP2023 (Strategic Perspectives 2023)
<u>Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050</u>	ESABCC	2023	ESABCC2023 (ESABCC 2023)
<u>Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector</u>	IEA	2021	IEA2021 (IEA 2021)
<u>Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz</u>	BMWK	2022	BMWK2022 (BMWK 2022)
<u>CO<sub>2</sub>-Entnahme als integraler Baustein des Europäischen »Green Deal«</u>	SWP	2022	SWP2022 (SWP 2022)
<u>2030 climate target plan</u>	EU-Kommission	2021	EUC2021 (EC 2021)
<u>Breaking free from fossil gas</u>	Agora Energiewende	2023	AEW2023 (Agora Energiewende 2023)
<u>1,5°C national pathway explorer</u>	Climate Analytics	2022	CA2022 (Climate Analytics 2022)
<u>The state of Carbon dioxide Removal, 1st Edition</u>	Smith et al.	2023	UoO2023 (Smith et al. 2023)
<u>Options for supporting Carbon Dioxide Removal</u>	New Climate Institute	2020	NCI2020 (New Climate Institute 2020)
<u>The Global Potential for Carbon Dioxide Removal</u>	Timothy Lenton	2014	Lenton2014 (Lenton 2014)
<u>Carbon Dioxide Removal FAQs</u>	US DOE	2022	USDOE2022 (U.S. Department of Energy 2022)
<u>Synthesis Report of the IPCC: Sixth Assessment Report</u>	IPCC	2023	IPCC2023 (IPCC 2023)
<u>dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität</u>	dena	2021	dena2021

**Tabelle 7-2: Definition von Carbon Dioxide Removal (CDR), technischen und natürlichen Senken sowie dessen Optionen nach untersuchten Quellen**

Studie	Definition CDR/negative Emissionen ...	Definition technische Senken	Optionen technische Senken	Definition natürliche Senken	Optionen natürliche Senken
ESABCC2 023 (ESABCC 2023)	Der Kohlenstoffabbau bezieht sich auf anthropogene Aktivitäten, durch die CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernt wird, indem terrestrische biologische Senken ("die Landsenke") (6) und Technologien wie BECCS und DACCS. Unterscheidung in diese 3 Kategorien		a) direkte CO <sub>2</sub> Abspaltung von einer industriellen Emissionsquelle, ist aber kein „removal“ b) BECCS und DACCS		Wiederherstellung von Grass- und Weideland, Wald- und Ernteprodukte; Keine Holzkohlenutzung oder marine Aktivitäten
AEW 2023 (Agora Energiewende 2023)					LULUCF
CA 2022 (Climate Analytics 2022)	Carbon direct removal = negative Emissions technologies			Natürlich = biologisch; (keine Garantie für permanentes Speichern)	Beispiele: Aufforstung, Wiederherstellung von Ökosystemen
EUC 2021 (EC 2021)	Unterscheidung von negativen Emissionen in „CDR Technologies“ und „Land-Use and Forestry“				verbesserter, verstärkter Waldschutz, eine nachhaltigere Waldbewirtschaftung sowie eine nachhaltige (Wieder-)Aufforstung und bessere Bodenbewirtschaftung, unter anderem durch die Renaturierung von Feuchtgebieten, Mooren und geschädigten Flächen im Einklang mit der Biodiversitätsstrategie

Studie	Definition CDR/negative Emissionen ...	Definition technische Senken	Optionen technische Senken	Definition natürliche Senken	Optionen natürliche Senken
BMWK 2022 (BMWK 2022)	CDR bzw. Negativemissionen: Menschliche Aktivitäten, die CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernen und es für klimarelevante Zeiträume in geologischen Speicherstätten, terrestrischen oder ozeanischen Kohlenstoffspeichern oder langlebigen Produkten binden	Technologische CO <sub>2</sub> -Abscheidungs- und Entnahmemethoden stellen Verfahren dar, bei denen CO <sub>2</sub> mit unterschiedlichen technischen Methoden abgeschieden wird.	CCU, CCS, DAC	Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes → Fähigkeit von Ökosystemen CO <sub>2</sub> zu entnehmen und als Kohlenstoff zu speichern	Beschleunigung natürlicher Prozesse (Ozeandüngung), (Wieder)Aufforstung, Ökosysteme wiederherstellen, Humusanreicherung, Wiedervernässung von Mooren, Pflanzenkohle
IEA 2021 (IEA 2021)	Unterscheidung in natürliche senken und technische Lösungen. CDR umfasst die Nutzung erneuerbarer Stromquellen zur Herstellung großer Mengen von Biokraftstoffen mit CCUS, von denen ein Teil exportiert wird, und die direkte Abscheidung von Luft mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (DACCS)		DACCS, BECCS, Aufforstung,		Wälder und Böden
SP2023 (Strategic Perspectives 2023)	Unterscheidung von Entnahmen in natürlich senken und technische Entnahmen		inkludiert BECCS und DAC		LULUCF

Studie	Definition CDR/negative Emissionen ...	Definition technische Senken	Optionen technische Senken	Definition natürliche Senken	Optionen natürliche Senken
USDOE 2022 (U.S. Department of Energy 2022)	<p>Der Begriff Kohlendioxidabscheidung (Carbon Dioxide Removal, CDR) umfasst ein breites Spektrum von Ansätzen, die Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) direkt aus der Atmosphäre entfernen und speichern, um negative Emissionen zu erzeugen. Die Speicherung kann in geologischen, biobasierten oder ozeanischen Reservoirs oder in Mehrwertprodukten wie kohlenstoffarmem Beton erfolgen. kohlenstoffarmen Beton</p>		DAC		Auf- und Wiederaufforstung
Lenton 2014 (Lenton 2014)	<p>„Kohlendioxid-Entfernung - oder Negative Emissions-Technologien - beschreibt eine Reihe von Methoden, die CO<sub>2</sub> durch biologische, chemische oder physikalische Mittel aus der Umgebungsluft entfernen und den dabei entstehenden Kohlenstoff in langlebigen Reservoirs speichern. Sie lassen sich in biologische, chemische und physikalische oder land- und ozeanbasierte Ansätze einteilen. <i>Hier schlage ich eine neue Kategorisierung in pflanzenbasierte, algenbasierte und alkalinitätsbasierte CDR-Ansätze vor.</i> „</p>			natürliche Senken sind Land und Ozean	

Studie	Definition CDR/negative Emissionen ...	Definition technische Senken	Optionen technische Senken	Definition natürliche Senken	Optionen natürliche Senken
NCI 2020 (New Climate Institute 2020)	CDR involviert erst die Entnahme von CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre und eine anschließende Speicherung. Es wird hier unterteilt in Biologische Entnahme und Speicherung, geologische Speicherung und mineralische Speicherung.	CO <sub>2</sub> kann auch mit technischen Möglichkeiten aus der Atmosphäre entfernt und z.B. unterirdisch gelagert werden.	BECCS; DACCS, beschleunigte Verwitterung, Mineral-Karbonisierung	Bei den biologischen Optionen sammeln die Pflanzen das CO <sub>2</sub> durch Photosynthese; das CO <sub>2</sub> wird in der Biomasse gespeichert.	Aufforstung, Wiederaufforstung, Holzkohle, Kohlenstoffspeicherung im Boden
UoO 2023 (Smith et al. 2023)	Wir definieren CDR als Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre und dessen Speicherung für Jahrzehnte bis Jahrtausende -> IPCC-Definition & CDR folgt 3 Prinzipien: 1. CO <sub>2</sub> muss aus der Atmosphäre entstammen, 2. dauerhafte Speicherung und 3. Ergebnis von menschlichem Eingreifen sein	Hier als neues (novel) CDR bezeichnet. Dabei wird CO <sub>2</sub> in geologischen Formationen, dem Ozean oder Produkten gespeichert.	BECCS, DACCS, Holzkohle und Ozean-Alkalinisierung	Hier definiert als konventionelles CDR an Land: Methoden, die CO <sub>2</sub> aus dem Landreservoir einfangen und speichern. Diese sind häufig unter LULUCF aufgeführt	Aufforstung/Wiederaufforstung; Bodenkohlenstoff in Anbauflächen und Grasland; Wiederherstellung von Torf- und Feuchtgebieten; Agroforstwirtschaft; verbesserte Waldbewirtschaftung; und dauerhaft geerntete Holzprodukte
dena 2021 (dena 2021)		Technische Senken, das heißt technische Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus Punktquellen oder der Atmosphäre		„Natürliche Senken“ bezeichnen die Kohlenstoffaufnahme und -speicherung durch natürliche Ökosysteme	



Studie	Definition CDR/negative Emissionen ...	Definition technische Senken	Optionen technische Senken	Definition natürliche Senken	Optionen natürliche Senken
IPCC 2023 (IPCC 2023)	Anthropogene Aktivitäten, bei denen Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) aus der Atmosphäre entfernt und dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirien oder in Produkten gespeichert wird. Er umfasst die bestehende und potenzielle anthropogene Verstärkung biologischer oder geochemischer CO <sub>2</sub> -Senken und die direkte Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid in der Luft (DACCS), schließt jedoch die natürliche CO <sub>2</sub> -Aufnahme aus, die nicht direkt durch menschliche Aktivitäten verursacht wird.	Negativemissionen aus den Energie-Bereich	BECCS und DACCS	LULUCF: LULUCF ist ein Sektor des Treibhausgasinventars, der die anthropogenen Emissionen und den Abbau von Treibhausgasen auf bewirtschafteten Flächen umfasst, mit Ausnahme der nicht CO <sub>2</sub> -haltigen landwirtschaftlichen Emissionen.	LULUCF (inkl. Eindämmung der Entwaldung)
Günther et al. 2023 Günther und Ekardt (2023)	The debate has shifted towards the role of NETs and how to distinguish between the different forms of these approaches. Two concepts have emerged from this debate: “nature-based” and “engineered removals.” While the former refers primarily to the conservation and enhancement of existing natural sinks, the latter describes the deployment of industrial carbon and capture facilities to remove CO <sub>2</sub> from the air and store it underground.	„engineered negative emission technologies“	Beispiele: BECCs & DACCS	conservation and enhancement of existing natural sinks	e.g., forestry, peatland management, ecosystem restoration

## Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende (2023): Breaking free from fossil gas: A new path to a climate-neutral Europe  
Agora Energiewende (Hg.). Online verfügbar unter [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_07\\_EU\\_GEXIT/A-EW\\_292\\_Breaking\\_free\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_EU_GEXIT/A-EW_292_Breaking_free_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Babiker, M.; Sugiyama, M.; Cohen, B.; Toribio Ramirez, D.; Blok, K. (2022): Data for Figure SPM.7  
- Summary for Policymakers of the Working Group III Contribution to the IPCC Sixth  
Assessment Report.
- Bellamy, R.; Osaka, S. (2020): Unnatural climate solutions? In: *Nat. Clim. Chang.* 10 (2), S. 98–99.  
DOI: 10.1038/s41558-019-0661-z.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Evaluierungsbericht der  
Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). Online verfügbar unter  
[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Climate Analytics (2022): 1.5°C National Pathways Explorer. Online verfügbar unter  
<https://1p5ndc-pathways.climateanalytics.org/countries/european-union/ambition-gap/>, zuletzt  
geprüft am 18.09.2023.
- dena (Hg.) (2021): Jugel, C.; Albicker, M.; Bamberg, C.; Battaglia, M.; Brunken, E.; Bründlinger, T.;  
Dorfinger, P.; Döring, A.; Friese, J.; Gründig, D.; Hader, P.; Horneber, D.; Jankowska, K. et al.  
dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe.  
Abschlussbericht. dena; EWI; ITG; FIW; JUB; SUER; WI. Online verfügbar unter  
[https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf), zuletzt geprüft am 24.01.2024.
- EC - European Commission (2021): 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the  
way to climate neutrality. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550>, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- ESABCC - European Scientific Advisory Board on Climate Change (2023): Scientific advice for the  
determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030-2050  
ESABCC (Hg.), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- 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. et al.  
(2018): Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. In: *Environ. Res. Lett.*  
13 (6), S. 63002. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9f.
- Griscom, B. W.; Adams, J.; Ellis, P. W.; Houghton, R. A.; Lomax, G.; Miteva, D. A.; Schlesinger, W.  
H.; Shoch, D.; Siikamäki, J. V.; Smith, P.; Woodbury, P.; Zganjar, C.; Blackman, A. e. a.: Natural  
climate solutions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of  
America* (114 (44)), S. 11645–11650. Online verfügbar unter DOI: 10.1073/pnas.1710465114.

- Günther, P.; Ekardt, F. (2023): The Priority of Nature-based over Engineered Negative Emission Technologies: Locating BECCS and DACCS within the Hierarchy of International Climate Law. In: *Ecological Civilization* 1 (1), S. 1–15. DOI: 10.35534/ecolciviliz.2023.10004.
- ICF (2023): Malins, C.; Pereira, L.; Popstoyanova, Z.; Riemer, M.; Lonsdale, J.; Duscha, V. Support to the development of methodologies for the certification of industrial carbon removals with permanent storage, Technical scoping Paper.
- IEA - International Energy Agency (2021): Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector IEA (Hg.). Online verfügbar unter [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2022): Glossary. In: *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*: Cambridge University Press, S. 803–830. Online verfügbar unter <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-and-land/glossary/D259B6979955B43B303FBD34D3FB5433>.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) IPCC, Geneva, Switzerland (Hg.). Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Lenton, T. M. (2014): The Global Potential for Carbon Dioxide Removal: Geoengineering of the Climate System. In: *Environmental Science and Technology* (38). Online verfügbar unter <https://www.rifs-potsdam.de/sites/default/files/2018-04/The%20Global%20Potential%20for%20Carbon%20Dioxide%20Removal.pdf>, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Minx, J. C.; Lamb, W. F.; Callaghan, M. W.; Fuss, S.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; Oliveira Garcia, W. de; Hartmann, J.; Khanna, T.; Lenzi, D.; Luderer, G. et al. (2018): Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (6), S. 63001. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9b.
- New Climate Institute (2020): Options for supporting Carbon Dioxide Removal: Discussion paper. New Climate Institute. Online verfügbar unter [https://newclimate.org/sites/default/files/2020/07/Options-for-supporting-Carbon-Dioxide-Removal\\_July\\_2020.pdf](https://newclimate.org/sites/default/files/2020/07/Options-for-supporting-Carbon-Dioxide-Removal_July_2020.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Öko-Institut (Hg.) (2023): Cames, M.; Mader, C.; Hermann, A.; Köhler, A. R.; Malinverno, N.; Möller, M.; Niesen, B.; Som, C.; Wäger, P. Chancen und Risiken von Methoden zur Entnahme und Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, Empfehlungen aufgrund der Analyse des Wissensstandes und einer systematischen Befragung von Fachleuten in der Schweiz (TA-SWISS 80/2023).

- Prognos (2021): Technische CO<sub>2</sub> -Senken - Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO<sub>2</sub> - Negativemissionstechnologien: Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität Deutschen Energie-Agentur GmbH (Hg.). Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005\\_DLS\\_Gutachten\\_Prognos\\_final.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Seddon, N.; Chausson, A.; Berry, P.; Girardin, C. A. J.; Smith, A.; Turner, B. (2020): Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* (375 (1794)). Online verfügbar unter DOI: 10.1098/rstb.2019.0120.
- Smith, S. M.; Geden, O.; Nemet, G. F.; Gidden, M. J.; Lamb, W. F.; Powis, C.; Bellamy, R.; Callaghan, M. W.; Cowie, A.; Cox, E.; Fuss, S.; Gasser, T.; Grassi, G. et al. (2023): The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. Online verfügbar unter <https://www.stateofcdr.org>.
- Strategic Perspectives (2023): Choices for a more Strategic Europe, Brussels: The EU triple opportunity for energy security, reindustrialisation and competitiveness based on scenarios for 2040. Online verfügbar unter <https://strategicperspectives.eu/wp-content/uploads/2023/07/Choices-for-a-more-Strategic-Europe.pdf>, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- SWP - Stiftung Wissenschaft und Politik (2022): CO<sub>2</sub>-Entnahme als integraler Baustein des Europäischen »Green Deal«. In: *SWP-Aktuell*. Online verfügbar unter <https://www.swp-berlin.org/publikation/co2-entnahme-als-integraler-baustein-des-europaeischen-green-deal>, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- SWP (2023): Böttcher, M.; Geden, O.; Schenuit, F. Into the blue: The role of the ocean in climate policy (Comment, 2023/C 12). Online verfügbar unter <https://www.swp-berlin.org/publikation/into-the-blue-the-role-of-the-ocean-in-climate-policy>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- U.S. Department of Energy (2022): Carbon Dioxide Removal, Frequently Asked Questions: Fossil Energy and Carbon Management. Online verfügbar unter [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-07/Carbon-Dioxide-Removal-FAQs\\_7.8.22.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-07/Carbon-Dioxide-Removal-FAQs_7.8.22.pdf), zuletzt geprüft am 18.09.2023.