

ZWISCHENSYNTHESE: ANREIZE UND RAHMENBEDINGUNGEN FÜR CCUS IN DER SCHWEIZ

DeCIRRA Subprojekt 3

Autoren

Betz, Regina; Marchand, Christina; Castro, Paula; Loike, Kristina; Bauer, Christian;
Madi, Hossein; Honegger, Matthias; Schildhauer, Tilman; Tschan, Martin;
Vlaskou, Dimitra; Vassek, Frank; Bolliger, Andreas

Reviewer

Fedrizzi, Thomas; Roggli, Ronny; Helbling, Claudio; Hofstetter, Patrick;
Vannoni, Stefan

betz@zhaw.ch

Kontakt für Rückfragen

Zusammenfassung

Der vorliegende Zwischenbericht des Sub-Projektes 3 (SP3) des Innosuisse Flagship Projektes DeCIRRA (Decarbonisation of Cities and Regions with Renewable gases) zeigt den Projektstand nach eineinhalb Jahren des vierjährigen Projektes. Das SP3 will einen Beitrag leisten zur Dekarbonisierung der Schweiz, im Speziellen zum Thema Carbon Dioxide Removal (CDR) bzw. Negativemissionstechnologien (NET) sowie Carbon Capture and Storage (CCS) und die stoffliche Nutzung von Abgefangenem CO₂ in Produkten (CCU). Während die anderen Subprojekte technischer Natur sind, ist SP3 interdisziplinärer und hat neben der technischen auch eine ökonomische Sicht auf die Technologien und bezieht dabei sowohl Carbon Capture and Utilisation/Storage (CCUS), wie auch biologische Methoden, z.B. die Nutzung von Holz (TCCS), Biomasse (BECCS) und Biochar in der Betrachtung mit ein. Zusätzlich hat das SP3 auch das Ziel, die für die Dekarbonisierung wichtigen Akteure in der Schweiz zu identifizieren und zu vernetzen, um somit die Kenntnisse über CDR und NET zu verbreiten und so eine schnellere Skalierung der besten Technologien zu unterstützen.

Im ersten Jahr hat sich SP3 vor allem mit folgenden Aufgaben beschäftigt: Literaturstudium, Erfassung und Quantifizierung der in der Schweiz bereits vorhandenen Projektergebnisse, bzw. für die Schweiz sinnvollen Technologien, Identifizierung der wichtigen Akteure und Stakeholder, Aufbau eines Netzwerkes und Vernetzung der relevanten Akteure, Vertiefung und Verbreitung des Wissens bei den Akteuren. Im zweiten Jahr wurden dann die aktuellen CDR Projekte analysiert, sowie Akteure zu ihren Rollen, ihrer Zusammenarbeit, und ihren Ansichten befragt. Weiterhin wurden Politikbedarfe für die Umsetzung identifiziert und analysiert. Diese Arbeiten wurden von drei Masterarbeiten begleitet.

Als Ergebnis liegt in diesem Bericht für jede der Technologien neben der generellen Beschreibung, eine Life Cycle Analyse der Systemgrenzen und Materialflüsse vor. Risiken und Chancen, z.B. in Form von Co-Benefits, Kosten und Potentialen werden ebenso betrachtet wie die wichtigsten Akteure, bestehende nationale und internationale Politiken und Regeln für die Anrechenbarkeit gemäss unterschiedlichen Ebenen z.B. der internationalen Klimaverhandlungen, nationalen Gesetzgebungen und den Überschneidungen mit dem freiwilligen Markt. Zusätzlich werden die CO₂ Infrastruktur sowie die Speicherung von CO₂ in eigenen Kapiteln beschrieben, da sie für mehrere der Technologien relevant sind. Weiterhin werden die Akteure und Politiken auch technologieübergreifend analysiert und kategorisiert.

Für die Analyse der Akteure werden vier Typen von Akteuren unterschieden: Die grossen Punktquellen-Emittenten (z.B. Zementwerke), Anbieter von NET-Dienstleistungen und Technologien (z.B. Betreiber von Biochar-Anlagen), Regulatoren (z.B. BAFU) und sonstige Dienstleister und Unterstützer, die NET und CCUS begleiten (z.B. Forschungsinstitutionen, Beratungsunternehmen, Medien). Insgesamt 139 Akteure nahmen an der Umfrage zur Rolle der NET teil. Für alle untersuchten Akteure ist mindestens eine der NET-Technologien heute schon sehr relevant. BECCS wurde von ca. 25% der Akteure als von grosser Relevanz eingestuft, und ist somit die für die Schweiz am wichtigsten eingestufte NET.

Unter den befragten Akteuren wurden die Bundesämter (BAFU und BFE) als besonders wichtig für die Schweizer CDR-Politik betrachtet; weiterhin werden die Kehrrichtverbrennungsanlagen, die technischen Hochschulen und Politiker besonders oft genannt. Diese Akteure sind sehr aktiv, gut vernetzt und nehmen eine wichtige Rolle beim Voranbringen der Technologien ein. Aber auch die Zementindustrie wird als wichtiger Akteur gesehen, wobei hier die Vernetzung und Einbindung noch weiter ausgebaut werden sollte.

Für einen Überblick über relevante aktuelle und abgeschlossene Projekte im Bereich NET und CDR wurden 140 Projekte evaluiert und kategorisiert, wobei dabei vor allem die ARAMIS Datenbank als Grundlage diente. Die meisten Projekte wurden zum Thema Carbon Point Capture gefunden, gefolgt von Biochar und weiteren biologische Methoden. Mit der Nutzung des CO₂ (CCU) beschäftigen sich rund 20 Projekte.

Um die Akzeptanz und den Nutzen von politischen Instrumenten kurzfristig (2030) und langfristig (2050) besser einschätzen zu können, wurden die zuvor identifizierten Akteure bzgl. ihrer Präferenzen in Bezug auf Politiken für die fünf grossen NET/CCS-Technologien befragt: TCCS, Biochar, BECCS, CCS/CCU und biologische Methoden. Folgende 6 Politiken wurden zur Bewertung vorgegeben: CO₂-Preis; handelbare Zertifikate (diese wurden als Kompensationsgutschriften definiert); Befreiung von der CO₂-Abgabe; Steuergutschriften; Verträge mit Preisgarantie und verbindliche Ziele. Insgesamt ergab die Umfrage, bei der sich ca. 140 Personen beteiligten, über alle Technologien hinweg einen breiten Konsens, dass ein CO₂-Preis – sei es durch eine Abgabe oder ein Emissionshandelssystem – ein zentrales politisches Instrument ist, um die NET-Technologien in der Schweiz voranzubringen. Dies wurde vor allem von den Technologieherstellern favorisiert. An zweiter Stelle wurde verbindliche Ziele genannt, welche speziell von den Regulatoren präferiert worden sind. Überraschenderweise wurden Steuergutschriften als wenig attraktiv bewertet, obwohl diese in den USA und Kanada ein zentrales Instrument der Klimapolitik darstellen. Im Workshop und in den offenen Fragen wurden weitere wichtige Förderinstrumente genannt: Subventionen, besonders für die Forschung-, Pilot- und Demonstrationsprojekte und Unterstützung bei der Finanzierung.

Ein Ziel des Projektes ist es für die analysierten Technologie die Potenziale und Kosten zu verstehen, um daraus Ideen für einen optimalen Schweizer Mix in Form einer «Pseudo Merit Order» oder «CO₂ Removal Cost Curve» ableiten zu können. Die Potenzial- und Kosteninformationen wurden vor allem aus der Literatur entnommen, wobei die Datenvarianz und Unsicherheiten sich als sehr gross erwiesen. Daher wird im weiteren Verlauf des Projektes Ziel sein diese Daten mit Hilfe der Praxispartner mit Informationen aus Anlagen und Pilotprojekten abzugleichen.

Ausserdem werden innerhalb des SP3 im nächsten Schritt Szenarien entwickelt, da nur so die grosse Komplexität abgebildet und für verschiedene Kombinationen sinnvolle Ergebnisse generiert werden können. Dies ist als Ergänzung zur «Pseudo Merit Order» sehr wichtig, da diese die Technologien nur einzeln betrachtet, jedoch in Realität das Potenzial einer Technologie von den anderen beeinflusst wird, z.B. durch die Nutzung gleicher Ressourcen. Dabei wurden Szenarien mit den Stakeholdern in einem Workshop verglichen und Gemeinsamkeiten, Unterschiede wie auch Lücken identifiziert. Desweiteren hat sich gezeigt, dass die Quantifizierung und Anrechnung der negativen Emissionen bzw. vermiedenen Emissionen auf den verschiedenen Ebenen (nationales Inventar, Projektebene), eine grosse Herausforderung ist, die innerhalb des Projektes im weiteren Verlauf weiter untersucht werden wird. Hier sind im Besonderen die Systemgrenzen zwischen dem freiwilligen und dem Pflichtmarkt, aber auch die Ländergrenzen und die Grenzen bei der Verarbeitung bei z.B. Holz klar zu definieren und natürlich internationale Richtlinien, z.B. das Pariser Abkommen zu beachten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Hintergrund	10
1.2 Zielsetzung des SP3	11
1.3 Umfang und Struktur des Synthesezwischenberichts	12
1.4 Prozesse und Methoden	14
1.4.1 Wissensaufbau und -austauschprozesse	14
1.4.2 Angewandte wissenschaftliche Methoden	15
1.4.3 Meetings und Events	16
1.5 Definitionen von Begriffen	17
2 Analyse der biologischen und technischen CCUS Optionen	19
2.1 Überblick über Systemgrenzen zur Quantifizierung von Emissionen und anderen Umweltbelastungen	19
2.2 Biochar	21
2.2.1 Überblick	21
2.2.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Haupttreiber	24
2.2.3 Co-Benefits	26
2.2.4 Risiken	27
2.2.5 Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber	28
2.2.6 Relevante Akteure	32
2.2.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize	33
2.2.8 Bilanzierung	34
2.2.9 Offene Fragen	36
2.3 TCCS	38
2.3.1 Allgemeine Beschreibung	38
2.3.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber	39
2.3.3 Co-Benefits	43
2.3.4 Risiken	46
2.3.5 Schätzungen der Kosten, des Potentials und der wichtigsten Treiber	47
2.3.6 Relevante Akteure	52
2.3.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize	53
2.3.8 Bilanzierung	56
2.3.9 Offene Fragen und Ausblick	58
2.4 CO ₂ Abscheidung bei Biomasse Prozessen (BECCS)	59
2.4.1 Allgemeine Beschreibung	59
2.4.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme sowie die wichtigsten Treiber	60
2.4.3 Co-Benefits	61
2.4.4 Risiken	62
2.4.5 Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber	62
2.4.6 Relevante Akteure und Projekte	66

2.4.7	Nationale und internationale Politiken und Anreize	67
2.4.8	Bilanzierung.....	69
2.4.9	Offene Fragen	70
2.5	<i>Direct Air Capture (DAC)</i>	71
2.5.1	Allgemeine Beschreibung.....	71
2.5.2	Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber	72
2.5.3	Co-Benefits.....	72
2.5.4	Risiken und Herausforderungen	73
2.5.5	Potentiale.....	73
2.5.6	Kosten und wichtigste Treiber.....	74
2.5.7	Relevante Akteure	79
2.5.8	Nationale and internationale Politiken und Anreize	80
2.5.9	Bilanzierung.....	80
2.5.10	Offene Fragen	81
2.6	<i>CO₂ Transport</i>	82
2.6.1	Allgemeine Beschreibung.....	82
2.6.2	Risiken	82
2.6.3	Systemgrenzen, Kosten, Potenzial und der wichtigsten Treiber	83
2.6.4	Relevante Akteure	84
2.6.5	Nationale und internationale Politiken und Anreize	85
2.7	<i>CO₂ Speicherung</i>	91
2.7.1	Allgemeine Beschreibung.....	91
2.7.2	Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber	92
2.7.3	Co-Benefits.....	92
2.7.4	Risiken.....	92
2.7.5	Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber	93
2.7.6	Relevante Akteure	96
2.7.7	Nationale und internationale Politiken und Anreize	96
2.7.8	Finale Einschätzung	97
3	Akteure, Projekte und Politiken.....	98
3.1	Akteure.....	98
3.2	<i>Swiss CDR Projekte</i>	102
3.3	<i>Präferenzen zu Politikinstrumenten der Akteure</i>	103
4	Outlook.....	112
4.1	<i>Stand und Wissenslücken bzgl. Technology Screening und CO₂ Removal Cost Curve</i>	112
4.2	<i>Policy Screening, regulatorische Lücken und Ausblick auf zusätzliche Politikinstrumente ..</i>	115
4.3	<i>Ausblick bezüglich der Weiterentwicklung von Bilanzierungsansätzen</i>	118
5	Referenzen.....	120
6	Anhang.....	130

Abkürzungsverzeichnis

AER	Bundesamt für Raumentwicklung Federal Office for Spatial Development
AFOLU	Land-, Forst- und Landnutzung Agriculture, Forestry, and Land-use
ARA WWTP	Abwasserreinigungsanlage Wastewater treatment plant
BAFU SFOE	Bundesamt für Umwelt Swiss Federal Office of the Environment
BAV FOT	Bundesamt für Verkehr Federal Office of Transport
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BFE FOEN	Bundesamt für Energie Federal Office of Energy
BFH	Berner Fachhochschule Bern University of Applied Sciences
BLW FOAG	Bundesamt für Landwirtschaft Federal Office for Agriculture
CAPEX	Kapitalausgaben Capital expenditures
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CDR	Carbon Dioxide Removal
CH ₄	Methane
CHP	Combined heat and power plant
CO ₂	Carbon Dioxide
DA(C)C	Direct Air (Carbon) Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DeCIRRA	Decarbonization of Cities and Regions with Renewable Gases
DM	Dry matter
EBC	European Biochar Certification
EDA FDFA	Eidgenössisches Department für auswärtige Angelegenheiten Federal Department of Foreign Affairs
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology
e-NG	Renewable synthetic methane
EPD	Environmental Product Declaration
ERI FPI	Eidgenössisches Rohrleitungsinspektorat Federal Pipelines Inspectorate
ETHZ / ETH Zurich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Federal Institute of Technology Zurich
ETS	Emissions Trading Scheme
EU ETS	European Emissions Trading Scheme
Fibl	Forschungsinstitut für biologischen Landbau Research Institute of Organic Agriculture
FLh VZh	Full Load hours Vollzeit Stunden
FSC	Forest Stewardship Council
GHG	Greenhouse Gas
HEPIA Geneva	Hochschule für Landschaft, Technik und Architektur Genf Geneva School of Landscape, Engineering and Architecture - HEPIA
HES-SO	Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Art Western Switzerland
HTC	Hydrothermal Carbonization
HWP	Harvested Wood Products
ICROA	International Carbon Reduction and Offsetting Accreditation
IgCC	International Green Construction Code
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITMO	International übertragene Minderungsergebnisse Internationally Transferred Mitigation Outcome
IWB	Industrielle Werke Basel

KIG	Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit Federal law on climate protection goals, innovation and strengthening of energy security
KliK	Stiftung Klimaschutz und CO ₂ -Kompensation Foundation for Climate Protection and CO ₂ Compensation
KVA WE WIP	Kehrichtverbrennungsanlage Waste-to-Energy plants Waste incineration plants
LCA	Lebenszyklusanalyse Lifecycle assessment
L-DAC	Flüssige direkte Abscheidung aus Luft Liquid Direct Air Capture
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design Program
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft Land use, land-use change and forestry
MFH	Mehrfamilienhäuser, Multi-Family Homes
MRV	Monitoring, Reporting and Verification
NET	Negative Emission Technology
OGE	Open Grid Europe
OPEX	Operational expenditures
PAK PAHs	Polyzyklische aromatische Kohlenstoffe Polycyclic aromatic hydrocarbons
PCI	Projects of Common Interest
PEFC	Program for Endorsement of Forest Certification
PSA	Druckwechseladsorption Pressure swing adsorption
PSI	Paul Scherrer Institut
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaic
S-DAC	Solid Direct Air Capture
STEM	Swiss TIMES Energy Systems Model
TCCS	Timber Carbon Capture and Storage, Bauholz CCS
TRL	Technology Readiness Level
UREK-S	Umwelt, Raumplanung und Energiekommission des Ständerats Environment, Spatial Planning and Energy Committee of the Council of States
UVEK DETEC	Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr, Energie und Kommunikation Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications
VBSA	Verband Schweizer Abfallverwertungsanlagen Swiss Association of Municipal Solid Waste Incineration Plants
VCM	Voluntary Carbon Market
VCS	Verified Carbon Standard
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Zurich University of Applied Sciences

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Definition des nachhaltig realisierbaren Potenzials	12
Abbildung 2: Überblick über CDR-Methoden und CO ₂ Sequestrationsverfahren (Cobo et al. 2023). ..	19
Abbildung 3: Pyrolyseprozess (https://www.biochar-industry.com/biochar/)	22
Abbildung 4: Biochar Herstellungsanlagen (Link auf Webseite Biomacon)	24
Abbildung 5: Beispielhaftes Prozesssystem einer typischen Biochar-zu-Boden-Prozesskette, das die wichtigsten Aspekte der (Kohlenstoff-)Bilanzierung veranschaulicht; nach Terlouw et al. (2021).	25
Abbildung 6: Umrechnung der in einem Kubikmeter Holz gespeicherten Menge Kohlenstoffdioxid in Kohlenstoff (CLB Schweiz GmbH)	38
Abbildung 7: Visualisierung der (temporären) CO ₂ Speicherung und des damit verbundenen Temperatureffekts auf globaler Ebene für eine bestimmte Menge an (temporär) gespeichertem CO ₂ (Ciais et al. 2014, p. 548).	40
Abbildung 8: Exemplarisches Prozesssystem einer typischen TCCS-Prozesskette, das die wichtigsten Aspekte der (Kohlenstoff-)Bilanzierung veranschaulicht	41
Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung des Lebenszyklus eines Holzbaus und der je Lebensabschnitt anfallenden Kohlenstoffströme (Pittau et al. 2022, p. 15).	42
Abbildung 10: Unterschiede in den verursachten Treibhausgasemissionen für 1 m ³ Brettschichtholz produziert in der Schweiz, in Deutschland und in Ungarn (Frischknecht and Ramseier 2020, p. 11). .	42
Abbildung 11: Treibhausgasemissionen von 10 Fallbeispielen (Lamster 2023, p. 10)	45
Abbildung 12: Holzbaumehrkosten für eingebaute Bauprodukte in den tragenden Konstruktionen verglichen mit den traditionell verwendeten und funktional äquivalenten Mengen von Massivbauprodukten Stahl 235 und Beton C25/30 (eigene unveröffentlichte Berechnungen, Timber Finance Initiative, 2023).	48
Abbildung 13: Vergleich der Szenarien CH-Holz im Bau in rot und CH-Gebäudepark. Dabei entspricht das Potential des Gebäudeparks der maximalen Holzbauförderung im Schweizer Bausektor.	49
Abbildung 14: Gegenüberstellung des kumulierten Potentials des Gebäudesektors mit der Feststellung, dass ca. 65% des benötigten Bauholzes importiert wird.	50
Abbildung 15: Zuwachstabellen Baumarten (Quelle: S. Flückiger, Vortrag an S-WIN Wintertagung vom 26.1.2023, unveröffentlicht).....	51
Abbildung 16: Entwicklung von Ansätzen zur Zertifizierung und Abgeltung von TCCS (Timber Finance Initiative, 2022),	55
Abbildung 17: Systemgrenzen eines BECCS-Systems für die Wärme- und Stromerzeugung.....	60
Abbildung 18: Kosten von Carbon Capture aus verschiedenen Industrieprozessen (International Energy Agency 2022, p. 27). Biomasse-basierte Prozesse wurden von den Autoren ergänzt.	62
Abbildung 19: Prinzip-Skizze eines CO ₂ -Wäschers (z.B. Aminwäsche)	64
Abbildung 20: CO ₂ Punktquellen in der Schweiz: Zementwerke (CEM), Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und Kläranlagen (ARA); kumulierte Darstellung des jährlichen CO ₂ -Ausstosses, jeweils sortiert nach abnehmendem Beitrag der Anlagen (Teske et al. 2019).	65
Abbildung 21: Emissionen aus der Zementindustrie in 1990, 2019 und 2050 (Cemsuisse 2021).....	66
Abbildung 22: S-DAC (oben) und L-DAC (unten) Konfigurationen (International Energy Agency 2022, p. 22).	71
Abbildung 23: Schematisches Prozessdiagramm von DACCS-Systemen (angepasst von Sovacool et al. 2022).	72

Abbildung 24: Expertenmeinung zu Faktoren, die die DAC Entwicklung begrenzen. (adapted from Shayegh et al. 2021).	74
Abbildung 25: Jährliches Produktionsprofil von alpinen Solaranlagen im Vergleich zu Midlands. Alpine Solaranlagen erzeugen in den Wintermonaten deutlich mehr Strom als die Anlagen in den Midlands.	76
Abbildung 26: Aufschlüsselung der DAC-Kosten im Jahr 2020 gegenüber 2050.	78
Abbildung 27: CO ₂ -Netzwerk Karte (SAIPEM 2020)	83
Abbildung 28: Optionen für die Speicherung von CO ₂ in geologischen Formationen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2005)	91
Abbildung 29: Mögliche Ursachen von induzierter Mikroseismizität und Seismizität im Zusammenhang mit der geologischen Kohlenstoffspeicherung (Vilarrasa 2016)	93
Abbildung 30: CO ₂ Speicher Projekte in der Nordsee (Rystad 2022)	95
Abbildung 31: Potenzial für CO ₂ -Speicherung im Oberen Muschelkalk Aquifer, Schweiz (Diamond 2019)	95
Abbildung 32: Relevante CCS und CCU Akteure in der Schweiz entlang der Wertschöpfungskette (Tanner 2022)	98
Abbildung 33: Rollen im NET Akteurs-Netzwerk	99
Abbildung 34: Rollen der DeCIRRA Akteure in der für DeCIRRA zusammengetragenen Liste von 711 Einträgen, im Vergleich zu den 139 Umfrageteilnehmern.	100
Abbildung 35: Welche der NET-Technologien ist für Ihre Arbeit derzeit oder in naher Zukunft relevant. Mehrfachnennungen möglich.	100
Abbildung 36: Sehr wichtige Akteure für Schweizer CDR-Politik	101
Abbildung 37: Akteure die besonders häufig auf die Frage, ob eine enge Zusammenarbeit besteht, genannt wurden.	101
Abbildung 38: Das enge Kooperationsnetzwerk zwischen den befragten Schweizer NET-Akteuren.	102
Abbildung 38: Anzahl der geprüften Projekte, die sich mit den verschiedenen Technologien befassen. Die Projekte unter dem Stichwort: Klima, Material und Allgemein konnten keiner bestimmten CDR-Technologie zugeordnet werden.	103
Abbildung 39: Überblick über mögliche Politikinstrumente zur Unterstützung von CCUS-Ansätzen (Pape et al. 2023)	105
Abbildung 40: Politikinstrument-Ranking für TCCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=40)	106
Abbildung 41: Politikinstrument-Ranking für Biochar (Befragte aus allen Interessengruppen, N=48)	106
Abbildung 42: Politikinstrument-Ranking für BECCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=55)	107
Abbildung 43: Politikinstrument-Ranking für CCS/CCU (Befragte aus allen Interessengruppen, N=56)	108
Abbildung 44: Politikinstrument-Ranking für DACCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=26)	108
Abbildung 45: Politikinstrument-Ranking für biologische CCUS-Methoden (Befragte aus allen Interessengruppen, N=27)	109
Abbildung 46: Skizze einer CO ₂ Removal Cost Curve	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: DeCIRRA SP3 Events, organisierte und besuchte Workshops und Meetings	16
Tabelle 2: Übersicht über die für Biochar geltenden Normen zur Kohlenstoffentfernung (Eigene Darstellung auf Basis der Diskussion im DeCIRRA online-Workshop am 20.03.23)	35
Tabelle 3: Typische (CO ₂ -) Gehalte von Gasen aus industriellen Verfahren, die in der Schweiz zur Anwendung kommen	63
Tabelle 4: Verfahren zur Abtrennung von CO ₂ aus Gasmischungen	63
Tabelle 5: Schätzung der LCOE der nicht-alpinen PV in der Schweiz, heute und in Zukunft. Kostenspezifische Informationen sind Kannan und Turton entnommen (2014).	76
Tabelle 6: Informationen zu den Volllaststunden der in der Schweiz installierten Windenergieanlagen von 2018 bis 2022.	77
Tabelle 7: Schätzung der Stromgestehungskosten für Windenergieanlagen in der Schweiz, heute und in Zukunft. Kostenspezifische Informationen sind aus der STEM-Datenbank (Panos et al. 2022, 2023).	77
Tabelle 8: LCOH für elektrische Kompressionswärmepumpen. Die COP-Daten stammen aus Fasihi et al. (2019).	77
Tabelle 9 : Schätzung der LCOD für verschiedene Systeme heute und in der Zukunft.	78
Tabelle 10: Schätzung für die CO ₂ Pipeline (SAIPEM 2020)	84
Tabelle 11: Mögliche Varianten der Organisation und Finanzierung der CO ₂ Pipeline (angepasst von Athias et al. 2019)	87
Tabelle 12: Kosten für die Speicherung von CO ₂ im Untergrund (Kemmler et al. 2021, p. 34)	93
Tabelle 13: Geschätztes, globales geologisches (unterirdisches) Speicherpotential (GtCO ₂) (Clarke et al. 2023, p. 641)	94
Tabelle 14: Co-Nutzen der untersuchten CCUS-Technologien.....	112
Tabelle 15: Co-Risiken der untersuchten CCUS-Technologien und Infrastrukturbedarf	113
Tabelle 16: Potentiale der untersuchten CCUS-Technologien.....	114
Tabelle 17: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen zur Unterstützung der Entwicklung und Erprobung von CDR-Technologien bis 2030 (angepasst von Dittli, 2023)	130
Tabelle 18: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen zur Unterstützung der breiten Einführung von CDR-Technologien bis 2050 (angepasst Dittli, 2023)	133
Tabelle 19: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen für die Entwicklung von Transport und Speicher Kapazitäten (angepasst von Dittli, 2023)	136

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Das Schweizer Klimaschutzgesetz (Schweizerische Eidgenossenschaft 2022) sieht in Artikel 3 vor, dass der Bund dafür sorgt, «dass die Wirkung der in der Schweiz anfallenden von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 Null beträgt (Netto-Null-Ziel).» Dabei sollen:

- a) «die Treibhausgasemissionen so weit möglich vermindert werden;
- b) die Wirkung der verbleibenden Treibhausgasemissionen durch die Anwendung von Negativemissionstechnologien in der Schweiz und im Ausland ausgeglichen werden.»

Durch diese spezielle Gesetzesformulierung ist klar, dass Negativemissionstechnologien (NET) nicht als Ersatz für Minderungen gesehen werden, sondern nur für jene Emissionen genutzt werden sollen, die nicht anders vermieden werden können. Diese explizite Klarstellung im Gesetz ist wichtig, da sonst die Aussicht auf NET die heutige Nutzung fossiler Energien begünstigen würde und den Druck auf Emissionsminderungen reduzieren könnte. Wie dieser Bericht zeigen wird, sind die Kosten für Negativemissionen eher hoch und die Potentiale zur Speicherung im Untergrund in der Schweiz beschränkt und somit ist der Einsatz von Negativemissionstechnologien nur für schwer zu vermeidbare Emissionen eine Option.

Der Fokus des Subprojektes 3 von **Decarbonisation of Cities and Regions with Renewable gases** (DeCIRRA) liegt nicht nur auf Negativemissionen, d.h. der Kohlenstoffentfernung aus der Atmosphäre, sondern auch auf Carbon Capture and Utilization/Storage (CCUS), d.h. der Abscheidung von CO₂ aus Punktquellen, z.B. bei Kehrlichtverbrennungsanlagen. Bei CCUS werden die abgeschiedenen CO₂-Emissionen entweder gespeichert (CCS) oder genutzt (CCU). CO₂ wird also entweder fast vollständig aus dem Abgas entfernt und damit Emissionen **vermindert** (CCU und CCS von fossilen Quellen). Bei der Abscheidung aus Biomasseverbrennungsanlagen werden **negative Emissionen** erzeugt, indem das CO₂, das vorher z.B. durch Biomasse aufgenommen wurde, dauerhaft gespeichert wird.

Negativemissionstechnologien sind auch bekannt unter der Bezeichnung Carbon Dioxide Removal (CDR) und umfassen jegliche absichtlichen menschlichen Bemühungen technischer oder biogener Art, CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre zu entfernen und dauerhaft zu speichern. Im folgenden Bericht werden wir die Abkürzung CCUS und CDR verwenden, die auch NET umfasst. Welche Rolle CCU und CCS hierbei spielt, kommt sehr auf das Produkt bzw. den Speicher an, nämlich ob und wenn ja, wie lange das CO₂ tatsächlich gespeichert wird. Was hierbei genau als “dauerhaft” gilt, wurde wissenschaftlich und politisch auf internationaler Ebene noch nicht abschliessend festgelegt. Viele Stimmen argumentieren, dass jegliche Umkehr (also Wieder-emissionen) eine CO₂-Entfernung rückgängig machen, andere argumentieren für bestimmte Speicherdauern. Derzeit liegen in der Schweiz die politischen Anforderungen bei mindestens 30 Jahren Speicherung (CO₂ Verordnung)¹ und bei internationalen Standards bei 100 Jahren (Michaelowa et al. 2023) und manche fordern Dauern von mehr als 300 Jahre (Matthews 2010). Im Rahmen des UN Artikel 6.4 Mechanismus sind die Anforderungen an Massnahmen bzgl. Wieder-Emissionen noch in Erarbeitung (UNFCCC 2023).

Der grosse Unterschied zwischen CCS und NET besteht darin, dass erstere (im Fall einer fossilen Herkunft des Kohlenstoffs) die Mehrbelastung der Atmosphäre mit CO₂ reduzieren, während die Entfernung von CO₂ durch NET die Erdatmosphäre direkt entlasten. Diese Entfernung kann einerseits verhelpen Restmengen an verbleibenden Emissionen zur Erreichung des Netto-Null-Ziels auszugleichen und könnte bei entsprechender Steigerung der Anstrengungen andererseits – über das Netto-Null -Ziels hinaus – langfristig gar helfen netto negative Emissionen in der Schweiz zu erreichen. Ein weiterer Unterschied liegt auch darin, dass bei Emissionsreduktionen ein Referenzszenario bzw. eine Baseline notwendig ist, um genau zu bestimmen, wie hoch die relative Reduktion ist wobei hier unterschiedliche Optionen bestehen (z.B. wie wurde die Wärme bzw. Elektrizität erzeugt, die nicht mehr gebraucht wird). Bei technischen negativen Emissionen ist die Baseline einfacher zu bestimmen, da meist davon ausgegangen werden kann, dass keine negativen Emissionen angefallen wären. Wegen diesen

¹ Nach Angaben des BAFU sind die Anforderungen min. 30 Jahre aus juristischen Gründen so festgelegt worden.

Unterschieden werden in diesem Bericht Emissions-Minderungen bzw. Reduktionen und negative Emissionen (CDR) getrennt ausgewiesen.

Der Bundesrat (2022) hat auf Basis der Energieperspektiven 2050+ festgelegt, dass die Schweiz für die Erreichung ihres Netto-Null-Ziels die schwer vermeidbaren Emissionen aus der Landwirtschaft, dem Abfallsektor und der Industrie mit ca. 7 Mio. t CO₂ jährlich durch NET ausgleichen müsste (wobei davon 2 Mio. t im Inland und weitere 5 Mio. t im Ausland vorgesehen sind) und zusätzlich noch 5 Mio. t CO₂ mit CCS zu speichern sind. Diese Grössenordnung ergibt sich auch aus anderen Modellrechnungen. So wurde innerhalb der SCCER Joint Activity Scenarios & Modelling (JASM) ein CCS Volumen von 10-20 Mio t CO₂/a bis 2050 geschätzt (Panos et al. 2021).

Der vorliegende Zwischensynthesebericht hat das Ziel:

1. den Stand des Wissens der Forschungs- und Implementierungspartner des DeCIRRA Unterprojektes 3 und relevanter externer Experten im Bereich CCUS und CDR zusammenzufassen,
2. Wissenslücken zu identifizieren und daraus offene Forschungsfragen abzuleiten und
3. aufbauend auf diesen einen Ausblick auf die weiteren Forschungsschwerpunkte in 2023-25 zu geben.

Vier verschiedene NET-Ansätze werden im Rahmen des Subprojektes 3 umfassend untersucht:

1. CO₂-Einlagerung in Pflanzenkohle (engl. Biochar)
2. CO₂ Speicherung im Holzbau, sogenanntes Timber Carbon Capture and Storage (TCCS)
3. Bioenergienutzung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS)
4. Direkte CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre und Speicherung (DACCS).

Bei den letzten beiden Massnahmen werden der CO₂ Transport mit einem Fokus auf CO₂ Pipeline und die CO₂ Speicherung in separaten Kapiteln betrachtet, da sie sowohl für BECCS und DACCS wichtig sind und sonst erhebliche Wiederholungen entstanden wären. Die Auswahl der vier Ansätze innerhalb des Subprojektes 3 erfolgte aufgrund folgender Kriterien:

- Hoher Technology readiness level (TRL)
- Implementierungspartner im DeCIRRA Projekt mit entsprechender Expertise
- Relevantes Potential für die Schweiz im Inland und/oder im Ausland

1.2 Zielsetzung des SP3

Ziel des SP3 ist es das **nachhaltig realisierbare Potential** für CCUS und CDR abzuschätzen, indem technische, wirtschaftliche, ökologische Kriterien aber auch die soziale Akzeptanz als Kriterien berücksichtigt werden. Dabei sollen die Rahmenbedingungen analysiert werden, die dieses Potential beeinflussen bzw. Politiken vorgeschlagen werden, mit Hilfe dieser das Potential umgesetzt werden würde.

Der Bundesrat hat in seinem Bericht zur Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz (Bundesrat 2020) folgendes Vorgehen bei der Klassifizierung von nachhaltigem und realisierbarem Potential vorgestellt. Abbildung 1 illustriert die verschiedenen Potenzialabgrenzungen an negativen Emissionen. Dabei unterscheidet der Bundesrat das theoretische Potenziale («Innerhalb der Grenzen der Physik und Chemie ...»), das technische Potenzial («Nach heutigem Stand der Forschung ...»), das wirtschaftliche Potenzial («Rechnet sich auf Basis der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen ...»), das ökologische Potenzial («Ohne den Ökosystemen zu schaden ...») und das soziale Potenzial («Was gesellschaftlich akzeptiert wird ...»). Daraus ergibt sich «das nachhaltig realisierbare Potenzial, das sich jedoch mit der Zeit – z. B. abhängig von technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen – verändern kann» (Bundesrat 2020, p. 13).

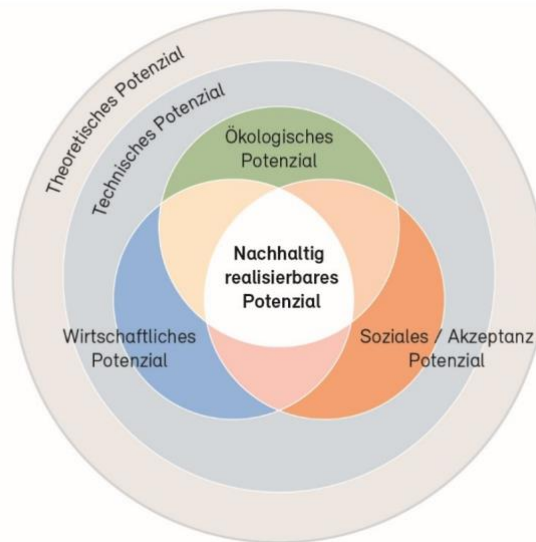


Abbildung 1: Definition des nachhaltig realisierbaren Potenzials

Dieses Potenzial wird durch die Beantwortung der folgenden zentralen Forschungsfragen abgeschätzt:

A Technologisches und wirtschaftliches Potenzial:

1. Was ist die effizienteste Lösung, wenn man die internationalen Entwicklungen in Bezug auf die CO₂ Speicherung und den H₂ Import berücksichtigt?
 - a. **Kombination** der vier bewerteten CCUS,
 - b. **Zeitpunkt** der Investitionen
2. Welche **Akteure** müssen in die Planung und Umsetzung verschiedener CCUS- und CDR-Ansätze einschließlich der erforderlichen Infrastruktur einbezogen werden, um eine erfolgreiche Finanzierung und Kommunikation in der Schweiz sicher zu stellen?
3. Welche **Bilanzierungs- und Umsetzungsrahmen gibt es auf nationaler und internationaler Ebene**, um die Investitionen zu unterstützen, und welche Änderungen müssen vorgenommen werden, um Anreize für Investitionen in CCUS und CDR in der Schweiz zu schaffen, unter Berücksichtigung der Risiken der Doppelzählung und der Nicht-Dauerhaftigkeit sowie der Unsicherheiten in Bezug auf Emissionslecks?
4. Welche **politischen Maßnahmen und Einnahmequellen** (z.B. durch den Verkauf von Zertifikaten oder Kompensationen) stehen derzeit für die verschiedenen CCUS- und CDR-Ansätze zur Verfügung, und welche Lücken und Hindernisse bestehen und könnten durch zusätzliche Vorschriften beseitigt werden, um tragfähige Geschäftsmodelle und Investitionen für effiziente CCUS- und CDR-Mixe zu erreichen?

B Umweltpotenzial:

5. Wie werden **Zusatznutzen** (z. B. verbesserte Böden durch Biochar), **externe Kosten** (z.B. aufgrund der Land- und Wassernutzung) und Ansätze zur Risikominderung (z.B. Versicherungen) in der Investitionsanalyse berücksichtigt?

C Soziales Potenzial:

6. Welche CCUS- und CDR-Technologien, -Politiken und -Finanzierungsmechanismen werden **von der breiten Öffentlichkeit** in der Schweiz **unterstützt**, und wie könnten sich verschiedene Finanzierungsmechanismen und Rahmenbedingungen (auch hinsichtlich ihrer Verteilungswirkungen) auf die öffentliche Akzeptanz auswirken?

1.3 Umfang und Struktur des Synthesezwischenberichts

Der **Zwischensynthesebericht** soll den Status quo der in Abschnitt A und B des vorherigen Kapitels aufgeführten Forschungsfragen **zusammenfassen**. Die Fragen zum gesellschaftlichen Potenzial (C) werden erst im Abschlussbericht behandelt.

Für jeden CCUS- und CDR-Ansatz werden vier Bereiche untersucht, nämlich a) Technologie, b) Bilanzierung, c) Akteurslandschaft und d) Politikinstrumente.

Technologie: Für die vier identifizierten Technologien und Ansätze werden relevante Informationen zu den technischen und finanziellen Informationen (Investitions- und Betriebskosten) zusammengefasst, die hauptsächlich auf vorhandener Literatur basieren. Für einige Ansätze wie TCCS werden die zusätzlichen Kosten der Holzbauweise im Vergleich zu konventionellen Gebäuden herangezogen und für DACCS wird ein Vollkostenansatz verwendet. Da Biochar und BECCS neben dem abgeschiedenen CO₂ verschiedene Produkte/Dienstleistungen wie Strom und/oder Wärme bzw. Biochar als solche erzeugen, werden verschiedene Ansätze diskutiert, wie die Kosten zwischen diesen Produkten und der CO₂ Beseitigung und/oder Reduzierung aufgeteilt werden können.

In der Analyse werden auch potenzielle Zusatznutzen und **externe Kosten wie negative Umweltauswirkungen** sowie mögliche **Investitionshemmnisse** und Risiken ermittelt.

Accounting: Der Bericht untersucht drei Formen des "Accounting", die für das Verständnis der Investitionsanreize für Investoren, der Umweltintegrität und der Verfolgung und Quantifizierung der erwarteten und erzielten Minderungsergebnisse wichtig sind: 1) Ökobilanzierung (Lebenszyklusanalyse, LCA), 2) Bilanzierung in nationalen Treibhausgasinventaren und 3) die Methoden, die zur Quantifizierung von Minderungsergebnissen auf den Kohlenstoffmärkten verwendet werden.

Die Ökobilanz kann genutzt werden, um die erwarteten Material- und Emissionsflüsse bestimmter Wertschöpfungsketten besser zu verstehen und insbesondere das erwartete Minderungsergebnis als CO₂ oder eine relative Verringerung der CO₂ äquivalenten Emissionen zu berechnen. Die LCA als Disziplin erlaubt es, die vor- und nachgelagerten Emissionen zu berücksichtigen, einschliesslich jener, die ausserhalb der Schweiz anfallen. Sie ermöglicht somit einen direkten Vergleich der Umweltleistung verschiedener CDR-Optionen. Die Ökobilanz erfordert die Auswahl von geeigneten Systemgrenzen der Produktion und die Klärung der Zuordnung von Emissionsreduktionen zu spezifischen Produkten im Falle eines Prozesses, der zu mehreren Produkten gleichzeitig führt (z. B. Pyrolyse zur Herstellung von Biochar, Wärme und möglicherweise Bioöl als Nebenprodukt).

Im Zusammenhang mit nationalen Treibhausgasinventaren hat die Bilanzierung eine spezifische Bedeutung. Gemeinsame Anrechnungsregeln ermöglichen es Vergleichbarkeit zu schaffen in den Klimaschutz Anstrengungen der Länder. Indirekt ermöglichen es diese Regeln auch Politikinstrumente zur Unterstützung bestimmter CDR- und CCUS-Aktivitäten zu strukturieren und die Zurechnung über Ländergrenzen hinweg zu vereinheitlichen. Die Berichterstattung über Emissionsreduktionen und CO₂-Entfernung durch Senken im Rahmen der nationalen Treibhausgasinventare richtet sich nach den IPCC-Leitlinien, und alle Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) sind verpflichtet, diese zu befolgen und regelmäßig zu aktualisieren. Welche Emissionen und Senken berichtet werden, bedeutet jedoch nicht, dass diese auch zur Erfüllung der Klimaschutzziele angerechnet werden können. So wurden beispielsweise im Rahmen des Kyoto-Protokolls geerntete Holzprodukte in einer speziellen Zeile des Inventars aufgeführt, diese konnten aber nicht in der ersten Verpflichtungsperiode für die nationale Zielerfüllung angerechnet werden. Nur die gemäß Artikel 3.4 und 3.5 des Kyoto-Protokolls erzeugten Reduktionen konnten für die Erfüllung der Anforderungen verwendet werden. Wenn CCUS- und CDR-Aktivitäten den Transport von Biomasse (in Form von geernteten Holzprodukten) über eine nationale Grenze hinweg beinhalten, sollte dies auch konsequent im Inventar beider Länder berücksichtigt werden. Wenn beispielsweise das CO₂ in einem Land biologisch gebunden wird (durch das Wachstum der Biomasse) und dann zu Biochar verarbeitet wird, die in einem anderen Land in den Boden eingebracht wird, ist es wichtig alle Anrechnungsschritte genau zu kennen und konsistent entsprechend einer einheitlichen IPCC-Anleitung zu spezifizieren.

Im Zusammenhang mit Kohlenstoffmärkten sowohl denjenigen, die im Rahmen von Artikel 6 des Pariser Abkommens geschaffen wurden wie auch den freiwilligen Kohlenstoffmärkten wird der Begriff "Bilanzierung" manchmal auch verwendet, um sich auf die Festlegung einer Ausgangsbasis und die Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung (den Englischen Begriffen folgend auch als MRV bezeichnet) der tatsächlich erzielten Emissionsreduktionen oder der CO₂ -Entfernung zu beziehen, die sich aus einer bestimmten Projektaktivität ergeben. Jeder Kohlenstoffmarkt unterliegt einem bestimmten Standard, der eine Reihe spezifischer Methoden umfasst, die für diese Berechnungen verwendet werden müssen, damit ein Projekt Minderungsergebnisse erzielt, die als Kohlenstoffmarktgutschriften gehandelt werden können (im Falle von Artikel 6.4 werden diese als "internationally transferred mitigation outcomes" bezeichnet). Daher liefert die Bilanzierung hier auch Informationen über die Anreize für Investitionen in bestimmte CCUS- und/oder CDR-Projekte.

Akteursanalyse: Die Akteure für jeden der CCUS- und CDR-Ansätze wurden nach ihrer Rolle geordnet ermittelt. Dies ermöglichte die Entwicklung einer **Akteursübersicht**, die auch in einem interaktiven

Modus verfügbar sein wird. Dies ermöglicht es zu verstehen, wer die Interessenvertreter und Gruppen sind, die für die Umsetzung der einzelnen CCUS- und CDR-Ansätze relevant sind.

Politik-Screening: Für jeden der CCUS- und CDR-Ansätze wird ein erstes Screening bestehender politischer Strategien und Vorschriften in der Schweiz und weltweit zur Unterstützung der Einführung der analysierten Optionen durchgeführt. Diese werden auf der Grundlage der verfügbaren Informationen und der vorhandenen Literatur qualitativ bewertet. Eine Befragung von Interessengruppen bietet darüber hinaus zusätzliche Einblicke in politische Präferenzen und Möglichkeiten (siehe Abschnitt 1.4.2 Einführung in die Umfrage und Abschnitt 3.3 mit den Ergebnissen). Darüber hinaus werden die Erkenntnisse aus dem DeCIRRA-Workshop zu Pseudo-Merit-Order und Politiken und Maßnahmen, der am 10. Mai 2023 stattgefunden hat, ebenfalls in Abschnitt 3.3. Dies trägt dazu bei, Regelungslücken im Ausblick zu identifizieren, die in der nächsten Projektphase im Mittelpunkt stehen werden. Die Politiken und Regelungen werden verschiedenen Typen (z.B. Märkte, Standards) zugeordnet und anhand einer Reihe von zu entwickelnden Kriterien (z.B. Effizienz, Effektivität) bewertet.

Zum Schluss enthält der Bericht einen Ausblick (Abschnitt 4), in dem die festgestellten Lücken und die nächsten Schritte zusammengefasst werden.

1.4 Prozesse und Methoden

Um die oben genannten Forschungsfragen zu beantworten, wurden neben wissenschaftlichen Methoden auch verschiedene Prozesse für den Wissensaustausch etabliert, die in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben werden.

1.4.1 Wissensaufbau und -austauschprozesse

Das DeCIRRA SP3 Konsortium besteht aus vier Forschungs- und zehn Implementierungspartner. Es war also nötig Prozesse zu etablieren, um den Wissensaustausch zwischen den verschiedenen Partnern sicherzustellen. Folgende Prozesse dienen zum Austausch innerhalb des Projektes und mit externen Experten:

- Fachgespräche
 - Die wissenschaftlichen Projektpartner führten diverse Fachgespräche mit einzelnen Implementierungspartnern und Fachexperten ausserhalb des Projektes durch. Bei den internen Fachgesprächen ging es auch darum die gegenseitigen Erwartungen an das Projekt und die Zusammenarbeit zu klären, ein gegenseitiges Verständnis aufzubauen und den Wissensstand auszutauschen.
- Workshops zu bestimmten Fachthemen
 - Für die Vernetzung, Erarbeitung und Konsolidierung von Wissen zu bestimmten Themenbereichen wurden online und zum Teil vor Ort Workshops durchgeführt.
 - Interne Workshops mit den DeCIRRA Partnern zu einzelnen Themenbereichen
 - Externe Workshops, die für weitere Akteure offen waren, bzw. die an öffentlichen Anlässen durchgeführt wurden.
- Wissensaufbereitung
 - Sowohl innerhalb der Workshops wie auch zur Erarbeitung von Themen wurde mit Miro Boards oder White Boards gearbeitet und die gesammelten Informationen ab fotografiert und gespeichert.
- Wissensaustausch
 - Es wurde eine gemeinsame Literaturdatenbank mit [Zotero](https://www.zotero.org/)² aufgebaut
 - Ein Excel-File mit Informationen von relevanten Akteuren und Projekten wurde entwickelt, das laufend aktualisiert wird.
 - Ein gemeinsamer One-Drive wurde angelegt, wobei nicht alle Partner darauf zugreifen können.
 - Ein Teil der Files und Daten, die allen zugänglich sein müssen, wurden auf google drive abgelegt, so dass gemeinsam daran gearbeitet werden kann.
 - Workshopergebnisse wurden direkt auf der [Miro-Plattform](https://miro.com/de/)³ geteilt und es wurden Protokolle erstellt, die den Teilnehmern zur Verfügung gestellt wurden.

² <https://www.zotero.org/>

³ <https://miro.com/de/>

Zur Unterstützung des Wissensaufbaus wurden jedes Jahr Master- und Bachelorarbeiten innerhalb des Projektes ausgeschrieben und betreut. Die folgenden Masterarbeiten konnten bereits finalisiert werden:

- 2022 Life Cycle Assessment of Biochar to Soil Systems: A Parametric Analysis. Masterarbeit ETHZ, Gudrun Hoeskuldsdottir.
- 2022 “Challenges and Opportunities for Biochar and Mass Timber Constructions as NETs In der Schweiz” von Sofia Cafaggi. Hier lag der Schwerpunkt auf den Akteuren der Biochar- und Holzindustrie der Erarbeitung grundlegender Bedürfnisse und Meinungen der Akteure.
- 2022 “Carbon Capture Storage (CCS) and Utilization (CCU) for Switzerland’s Path to Net Zero” von Cedric Tanner. Hier lag der Fokus auf CCS / U-Akteuren & denkbare Geschäftsmodelle
- 2023 Negativemissionstechnologien: Schweizer Akteur Netzwerk und die Einstellung zu Politiken von Luca Dittli mit einem Fokus auf Akteursmapping des gesamten NET Netzwerkes und den Einstellung zu Politiken. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde eine grosse Umfrage durchgeführt.

Die folgenden Bachelorarbeiten wurden betreut:

- 2022 Öffentliche Wahrnehmung von Negativemissions-technologien in der Schweiz - Eine Analyse anhand einer quantitativen Umfrage von Daria Sutter.
- 2023 Der Mediendiskurs zu Negativemissionstechnologien (NET) in der Schweiz von Maurin Forster.

1.4.2 Angewandte wissenschaftliche Methoden

Die folgenden wissenschaftlichen Methoden wurden zur Gewinnung weiterer Informationen verwendet.

- Literaturrecherche
 - Im Projekt wurde mit der Software Zotero gearbeitet. So können alle Projektmitarbeiter Literatur eintragen und diese kann direkt in Projektberichte usw. eingefügt werden. Im Laufe der ersten 1.5 Jahre wurden so über 350 Publikationen gesichtet und klassifiziert.
- Umfragen
 - Im Rahmen der Masterarbeit “Negativemissionstechnologien: Schweizer Akteur Netzwerk und die Einstellung zu Politiken” wurde eine grosse Umfrage unter allen NET-Akteuren der Schweiz durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Masterarbeit ausgewertet und sind in diesen Bericht eingeflossen.
 - Als Vorstudie zum Thema Akzeptanz wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Daria Sutter eine Umfrage an ca. 12000 ZHAW-Studierende versendet und ca. 300 haben den Fragebogen vollständig ausgefüllt, die nach ihrem Wissensstand zu NET und der Akzeptanz verschiedener NET-Ansätze befragt wurden.
- Interviews
 - Im Rahmen der Masterarbeiten wurden viele qualitative Interviews mit den NET-Fachexperten durchgeführt. Diese wurden aufgenommen, transkribiert und können in den Masterarbeiten nachgelesen werden.
- Textdatenanalyse
 - Im Rahmen der Bachelorarbeit von Maurin Forster wurde die Darstellung der NET-Ansätze in Schweizer Printmedien untersucht, dabei wurden 115 Zeitungsartikel quantitativ und qualitativ ausgewertet.

1.4.3 Meetings und Events

Folgende Events, Meetings und Workshops wurden durchgeführt oder besucht, bzw. sind in der nächsten Zeit geplant:

Tabelle 1: DeCIRRA SP3 Events, organisierte und besuchte Workshops und Meetings

Wann	Titel	Beschreibung	Teilnehmer
9.3.2022	Kickoff SP3 (online)	Einführung Team und Projekt	SP3 Research Partner
16.3.2022	WS Akteursnetzwerk (online)	Akteursnetzwerkerstellung, Visualisierung und Analyse, Input durch Fachexperten	SP3 Research Partner
18.5.2022	Kickoff DeCIRRA (vor Ort)	Einführung Team, Projekt und Arbeitsprozesse	DeCIRRA Teilnehmer
31.5.2022	Biochar KLIK	Austausch über die Möglichkeiten von Biochar als NET	KLIK, Betz
23.6.2022	SPIN Day mit Contribution DeCIRRA	CO ₂ Transportation, Pipeline...	Betz, Marchand, Biollaz & viele andere, die nichts mit DeCIRRA zu tun haben
5.10.2022	WS Biochar	DeCIRRA & Biochar, Merit Order Daten, Akteure	Offen für alle Biochar-Interessierten
14.10.2022	Tagung: BAFU zu NET	CO ₂ -Entnahme und -Speicherung: Notwendigkeit und Wege zur Umsetzung	Diverse Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik
2.11.2022	WS CO ₂ Pipeline	Wer, wie, wo CO ₂ Pipeline Schweiz	DeCIRRA SP3 und weitere Experten
8.11.2022	WS Hozbau als NET	Holzbau Status Update	Timberfinance, Core-Team
7.12.2022	WS CO ₂ Pipeline (online)	Fortsetzung und Präzisierung WS vom 2.11.	DeCIRRA SP3 und weitere Experten
27.1.2023	Konferenz: Disentis CO ₂ Pipeline	Diverse Inputs und WS an der Disentis Energie-Konferenz	DeCIRRA und weitere
31.1.2023	Konferenz: DemoUp Carma	Vernetzung mit dem Projekt, da es viele Schnittstellen gibt	Betz und weitere
13.3.2023	Fachgespräch CO ₂ Pipeline	Austausch zwischen Zementbranche und Projekt	
20.3.2023	WS Biochar (online)	Regulierung, Standards, Rahmenbedingungen, Co-Benefits von BioChar	DeCIRRA und weitere
28.4.2023	Event NET Suisse		
10.5.2023	WS Milestone Politiken & Daten	Überblick Politiken, Support und Pseude Merit Order NET	DeCIRRA SP3 und Gäste
	NET Networking Event	Austausch mit anderen grossen Projekten zum Thema NET, z.B. DemoUp Carma, CDR Speed2zero, ZCMA...	
Ende Juli	Bericht Milestone 1	Abstimmung und Fertigstellung des Milestone Berichts	
Herbst 2023	Meeting Holzbaus Accounting	Austausch zum Thema Standards im Holzbau, z.B. VERRA	DeCIRRA SP3 und Externe
Herbst 2023	Szenario Workshop mit ETHZ	Erarbeitung und Austausch über die möglichen Szenarien und Methoden	DeCIRRA SP3 und Externe
Winter 2023	Inventory Accounting Workshop (online)	Erarbeitung von Inventory und Account Methoden	
Jan 2024	SP3 Update	Meeting um die Erkenntnisse der letzten Schritte zusammen zu tragen.	

1.5 Definitionen von Begriffen

Die folgenden Definitionen wurden von den IPCC Definitionen abgeleitet und übersetzt (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023). Andere Quellen werden in den jeweiligen Abschnitten genannt.

Accounting (Cowie et al. 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006; UNFCCC 2003 para. 16): "Die Regeln für den Vergleich der gemeldeten Emissionen und Senken mit den von den Annex I Ländern im Rahmen des Kyoto-Protokolls eingegangenen Verpflichtungen". Bilanzierung bedeutet also die Berechnung von "Belastungen" und "Gutschriften" in Bezug auf das vereinbarte Ziel. Die Anrechnung im Rahmen des Kyoto-Protokolls war auf eine bestimmte Gruppe von anthropogenen Aktivitäten beschränkt. Es wird erwartet, dass die Bilanzierung auf den Schätzungen basiert, die für die Berichterstattung über das Inventar erstellt wurden, um Konsistenz zu gewährleisten und den zusätzlichen Aufwand zu minimieren, aber sie kann auch politische Elemente (z. B. Obergrenzen, Abzinsung) enthalten, die in Verhandlungen zwischen den Parteien vereinbart wurden.

Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CCS): Ein Verfahren, bei dem ein relativ reiner Kohlendioxidstrom (CO_2) aus industriellen und energiebezogenen Quellen abgetrennt (aufgefangen), aufbereitet, komprimiert und zu einem Speicherort transportiert wird, um ihn langfristig von der Atmosphäre zu trennen. Wird manchmal auch als Kohlenstoffabscheidung und -speicherung bezeichnet.

Anthropogene Steigerung von Treibhausgas Senken: Der Entzug von Treibhausgasen (THG) aus der Atmosphäre als Ergebnis bewusster menschlicher Aktivitäten. Dazu gehören die Verbesserung der biologischen Senken für CO_2 und der Einsatz von Chemietechnik zur langfristigen Entfernung und Speicherung. Die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS), die allein kein CO_2 aus der Atmosphäre entfernt, kann zur Verringerung des atmosphärischen CO_2 aus industriellen und energiebezogenen Quellen beitragen (und damit eine anthropogene Steigerung von Treibhausgas Senken darstellen), wenn sie mit der Bioenergieerzeugung (BECCS) kombiniert wird, oder wenn CO_2 direkt aus der Luft abgeschieden und gespeichert wird (DACCS).

Berichterstattung (Cowie et al. 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006; UNFCCC 2003 para. 16): Die Übermittlung der Schätzung von Emissionen und Treibhausgas-Senken auf allen bewirtschafteten Flächen an das UNFCCC in einer standardisierten Weise. Dies bezieht sich in der Regel auf die Übermittlung nationaler Treibhausgasinventare. Die Berichterstattung dient dazu, die anthropogene Komponente der geschätzten Emissionen und der Senkenleistung zu bestimmen.

Biochar Relativ stabiles, kohlenstoffreiches Material, das durch Erhitzen von Biomasse in einer sauerstoffarmen Umgebung entsteht. Biochar unterscheidet sich von Holzkohle durch ihren Verwendungszweck: Biochar wird als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt, um die Bodenfunktionen zu verbessern und die Treibhausgasemissionen von Biomasse zu verringern, die sich sonst schnell zersetzen würde.⁴ Die Abkürzung kann auch BCR lauten.

Bioenergie Energie, die aus jeglicher Form von Biomasse oder ihren metabolischen Nebenprodukten gewonnen wird.

Bioenergie mit Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (BECCS): Technologie zur Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CCS) in einer Bioenergieanlage. Beachten Sie, dass in Abhängigkeit von den Gesamtemissionen der BECCS-Lieferkette Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre entfernt werden kann.

CDR Methode: Synonym mit Negativemissionstechnologie. siehe auch Kohlendioxid-Entfernung (CDR).

Climate Smart Forestry (CSF): Climate-Smart Forestry (CSF) ist ein neuer Zweig der nachhaltigen Waldbewirtschaftung, der darauf abzielt, Wälder optimiert für den Klimawandel zu bewirtschaften. Spezifische CSF-Strategien werden als ein Weg zur Entwicklung geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen und zur Verbesserung der Bereitstellung von Ökosystemleistungen angesehen.

Direkte Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft und Speicherung (DACCS): technologisches Verfahren, bei dem Kohlendioxid (CO_2) unter Energieaufwand direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden und anschließend gespeichert wird. Auch bekannt als direkte Abscheidung und Speicherung (DACS).

⁴ Siehe auch <https://biochar-international.org/about-biochar/fags/>.

Kohlendioxidabscheidung und -nutzung (CCU): Ein Prozess, bei dem Kohlendioxid (CO₂) abgetrennt und der Kohlenstoff anschließend in einem Produkt verwendet wird. Die Klimawirkung von CCU hängt von der Lebensdauer des Produkts, dem Produkt, das es ersetzt, und der CO₂ Quelle (fossil, Biomasse oder Atmosphäre) ab. CCU wird manchmal auch als Kohlendioxidabscheidung und -verwendung oder Carbon Capture and Utilisation bezeichnet.

Kohlendioxid-Entfernung (CDR): Anthropogene Aktivitäten, bei denen Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entfernt und dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten gespeichert wird. Er umfasst die bestehende und potenzielle anthropogene Verstärkung biologischer oder geochemischer CO₂-Senken und die direkte Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid in der Luft (DACCS), schließt jedoch die natürliche CO₂ Aufnahme aus, die nicht direkt durch menschliche Aktivitäten verursacht wird.

Lebenszyklusanalyse (LCA): Zusammenstellung und Bewertung des Inputs, des Outputs und der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung während seines/ihrer gesamten Lebenszyklus.⁵

Leckage: Die Auswirkungen politischer Maßnahmen, die zu einer Verlagerung der Umweltauswirkungen führen und damit die beabsichtigten Auswirkungen der ursprünglichen Maßnahmen konterkarieren.

Negativemissionstechnologien (NET) (Schweizerische Eidgenossenschaft 2022 Art. 2): Negativemissionstechnologien: biologische und technische Verfahren, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen und dauerhaft in Wäldern, in Böden, in Holzprodukten oder in anderen Kohlenstoffspeichern zu binden.

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

Netto-Null-Emissionen (Schweizerische Eidgenossenschaft 2022 Art. 2): grösstmögliche Verminderung der Treibhausgasemissionen und Ausgleich der Wirkung der verbleibenden Emissionen durch die Anwendung von Negativemissionstechnologien.

Permanenz: Zeitraum, für den CO₂ vorübergehend gespeichert und aus der Atmosphäre entfernt wird und die damit verbundenen Klimaauswirkungen in Form eines verzögerten atmosphärischen Temperaturanstiegs. Meistens wird CO₂, das 100 Jahre oder länger gespeichert wird, als "dauerhaft entfernt" betrachtet (de Kleijne et al. 2022; Terlouw, Bauer, et al. 2021).

Removals: Kurzbezeichnung für Carbon Dioxide Removals (CDR).

Soziale Kosten: Die Gesamtkosten einer Maßnahme in Form von Verlusten an sozialem Wohlergehen, einschließlich externer Kosten im Zusammenhang mit den Auswirkungen dieser Maßnahme auf die Umwelt, die Wirtschaft (BIP, Beschäftigung) und die Gesellschaft als Ganzes.

Ungünstiger Nebeneffekt: Eine negative Auswirkung, die eine auf ein Ziel ausgerichtete Gesetzgebung oder Maßnahme auf ein anderes Gebiet hat und dadurch möglicherweise den Nettonutzen für die Gesellschaft oder die Umwelt verringert.

Zusatznutzen: Ein positiver Effekt, den eine auf ein Ziel ausgerichtete Politik oder Maßnahme auf ein anderes Ziel hat und dadurch den Gesamtnutzen für die Gesellschaft oder die Umwelt erhöht. Zusatznutzen werden auch als Co-Benefits bezeichnet.

⁵ Siehe auch die Norm ISO 14044: <https://www.iso.org/standard/38498.html>

2 Analyse der biologischen und technischen CCUS Optionen

2.1 Überblick über Systemgrenzen zur Quantifizierung von Emissionen und anderen Umweltbelastungen

Trotz der Tatsache, dass sich spezifische CDR-Methoden in ihrer Art erheblich unterscheiden (Abbildung 2) (Cobo et al. 2023; Fuss et al. 2018; S. Smith et al. 2023), erfordert die Quantifizierung ihrer langfristigen Wirksamkeit für die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre eine umfassende und konsistente Methode für die Bilanzierung von Treibhausgasemissionen (Brander et al. 2021; Terlouw, Bauer, et al. 2021).

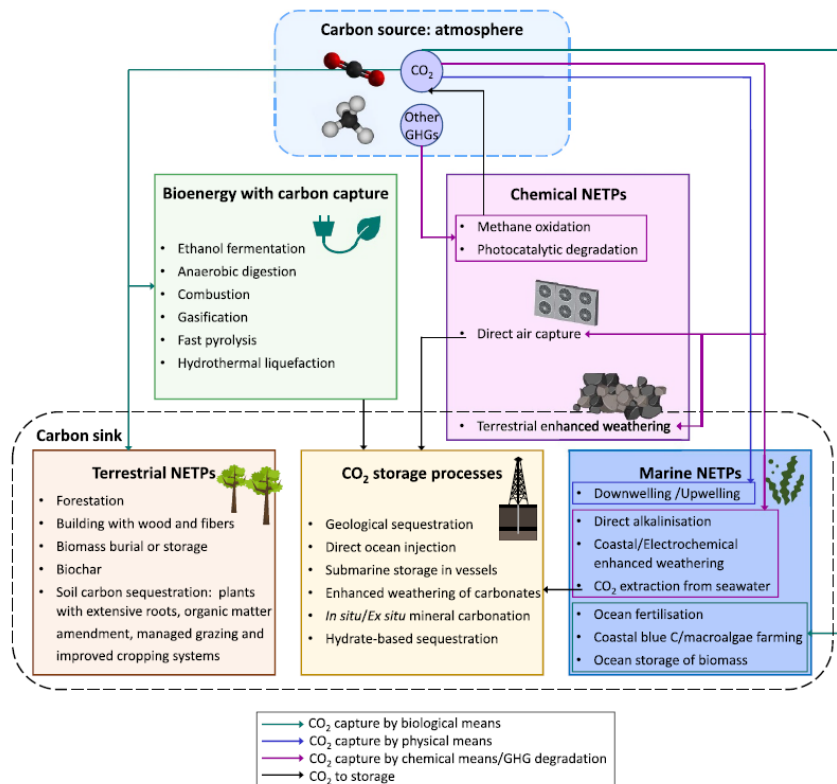


Abbildung 2: Überblick über CDR-Methoden und CO₂ Sequestrationsverfahren (Cobo et al. 2023).

Die ökologische Lebenszyklusanalyse (LCA) kann als geeignete Methode für diesen Zweck angesehen werden und wurde bereits für die Bewertung von CDR angewendet (Goglio et al. 2020; Terlouw, Bauer, et al. 2021). Die Anwendung der Ökobilanz auf CDR soll eine umfassende Bilanzierung der direkten und indirekten Treibhausgas- und anderer Emissionen in die Umwelt sowie des Ressourcenverbrauchs (z. B. in Form von Land, Wasser, Mineralien und Metallen) für jede CDR-Methode gewährleisten. Systemgrenzen im LCA-Kontext umfassen die Produktion, den Betrieb und das Ende der Lebensdauer eines Produkts oder einer Dienstleistung und alle damit verbundenen Energie-, Material- und Ressourcenflüsse sowie Emissionen in die Umwelt (Hauschild et al. 2018). Dazu gehört auch die benötigte Infrastruktur, die sogenannten "Investitionsgüter" (Frischknecht et al. 2007). Prozesse, die direkt in die Produktion, den Betrieb und das Lebensende eines Produkts oder einer Dienstleistung eingebunden sind, stellen das sogenannte "Vordergrundsystem" dar, das oft auch als "Produktsystem" bezeichnet wird. Prozesse, die mit Material- und Energieflüssen von und zu diesen Prozessen verbunden sind, stellen das so genannte "Hintergrundsystem" dar. Dieses Hintergrundsystem wird - in Bezug auf Emissions- und Ressourcenverbrauchs Daten, Material- und Energieflüsse - durch Datenbanken wie die ecoinvent LCA-Datenbank abgedeckt (Wernet et al. 2016).

Im Zusammenhang mit CDR stellt die dauerhafte (oder zumindest "langfristige") Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre die Dienstleistung dar, die ein CDR-Verfahren erbringt. Es besteht eine gewisse Unklarheit darüber, inwieweit die vorübergehende Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre - häufig aufgrund von Verfahren zur Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff (CCU) - als wirksame CDR betrachtet werden kann und welche Klimavorteile ihr zugerechnet werden können. Eine Schlüsselfrage in diesem Zusammenhang ist der Zeitraum, für den CO₂ vorübergehend gespeichert und aus der Atmosphäre entfernt wird (die so genannte Permanenz), und die damit verbundenen Klimaauswirkungen in Form eines verzögerten atmosphärischen Temperaturanstiegs. Idealerweise würde dies durch eine dynamische Bilanzierung der Kohlenstoffvorräte und -flüsse im Laufe der Zeit berücksichtigt und die damit verbundenen Klimaauswirkungen quantifiziert, z. B. in Form des veränderten globalen Erwärmungspotenzials von CO₂ Emissionen, die in der Zeit zurückverlagert werden (de Kleijne et al. 2022). Meistens wird CO₂, das 100 Jahre oder länger durch CCU oder auf andere Weise gespeichert wird, als "dauerhaft entfernt" betrachtet, d. h. mit einem Treibhauspotenzial (GWP) und Klimaauswirkungen von Null angerechnet (de Kleijne et al. 2022; Terlouw, Bauer, et al. 2021).

THG-Emissionen, die mit dem direkten und indirekten Energieverbrauch (Wärme und/oder Strom) von CDR-Methoden verbunden sind, verschlechtern die Klimawirkung und bestimmen somit die "Netto-Effizienz" oder "Netto-Effektivität" von CDR (entspricht der Bruttomenge an entferntem und dauerhaft gespeichertem CO₂ abzüglich der durch eine CDR-Methode verursachten direkten und indirekten THG-Emissionen aus Sicht der Ökobilanz). Weiterhin können auch Landnutzung und Landnutzungsänderungen und die damit verbundenen Klimaauswirkungen eine wichtige Rolle spielen, insbesondere bei CDR-Methoden, die in der einen oder anderen Weise auf Biomasse beruhen (S. Smith et al. 2023; Terlouw, Bauer, et al. 2021).

Da die Ökobilanz nicht nur THG-Emissionen und Klimaauswirkungen quantifiziert, sondern ein sehr breites Spektrum von Umweltbelastungen durch Schadstoffemissionen und Ressourcenbedarf berücksichtigt, kann sie - bis zu einem gewissen Grad - zur Quantifizierung von ökologischen Zusatznutzen und negativen Einflüssen der CDR verwendet werden (Cobo et al. 2022). Diese können sich auf die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme sowie auf die Ressourcenknappheit beziehen und müssen vor der breiten Nutzung jeder CDR Massnahme bewertet werden (Fuhrman et al. 2023; Streffler et al. 2021). Da solche Auswirkungen jedoch häufig standortspezifisch sind und Ökobilanzen in der Regel auf generische Weise durchgeführt werden, ohne die standortspezifischen Randbedingungen in Bezug auf die betroffene Bevölkerung oder Ökosysteme zu berücksichtigen, sind generische Ökobilanzergebnisse für andere Belastungen als die des Klimawandels mit Vorsicht zu interpretieren. Fallbezogene Bewertungen mit anderen Methoden als der Ökobilanz wären erforderlich. Es gibt auch potenzielle Nebeneffekte, die nicht innerhalb des etablierten LCA-Rahmens analysiert werden können, z. B. standortspezifische Veränderungen der Bodenqualität aufgrund von Biocharanwendungen, Auswirkungen auf das Nahrungsmittelsystem als indirekter Effekt der bioenergiebezogenen Landnutzung und auch soziale Auswirkungen (Bellamy und Geden 2019; Hasegawa et al. 2021).

Schließlich muss sich jede Bilanzierung auf eine bestimmte Menge eines Produkts oder einer Dienstleistung beziehen, in der Ökobilanzsprache die so genannte "funktionelle Einheit". Für CDR kann dies eine Einheit des aus der Atmosphäre entfernten Bruttokohlendioxids sein, was einen Vergleich verschiedener CDR-Methoden ermöglicht (Terlouw, Bauer, et al. 2021). Diese funktionale Einheit des "entfernten Bruttokohlendioxids" ermöglicht zwar einen direkten Vergleich der Umweltleistung verschiedener CDR-Optionen, muss aber in gewisser Weise die Tatsache berücksichtigen, dass viele CDR-Optionen zusätzlich zur CDR auch Güter oder Dienstleistungen bereitstellen, z. B. Baumaterialien im Falle von Holz als Baumaterial (TCCS) und Energieversorgung im Falle von BECCS. Mit anderen Worten: CDR ist möglicherweise nicht immer der Hauptgrund für die Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen, sondern eher ein Zusatznutzen. Dies muss auf fallbezogene Weise angegangen werden, was in den folgenden Kapiteln für jeden der Ansätze geschehen wird.

2.2 Biochar

2.2.1 Überblick

Biochar (Pflanzenkohle) ist ein wertvolles kohlenstoffreiches Material, das via Verkohlung ohne Sauerstoff aus organischer Biomasse gewonnen wird. Weil Pflanzen CO₂ aus der Luft binden, kann also durch die Herstellung von Biochar CO₂ aus der Luft entfernt und gespeichert werden. Rund die Hälfte des Kohlenstoffs in der Biomasse wird in Biochar umgewandelt, welcher je nach Verarbeitungstemperatur äusserst stabil ist, kaum biologisch oder chemisch abgebaut wird und daher gut im Boden gespeichert werden kann. Wird Biochar in den Boden eingebracht, kann so eine **Kohlenstoffsенke mit einer Halbwertszeit von bis zu 460 Jahre entstehen**, wobei je nach Studie, Herstellungsverfahren und Ausgangssubstanz kleinere Werte gefunden werden.⁶

Ausserdem hat Biochar dank seiner grossen Oberfläche auch andere Vorteile, z.B. kann es als Wasser- und Nährstoffträger z.B. die Bodenfruchtbarkeit verbessern oder in der Landwirtschaft Methan- oder Lachgasemissionen reduzieren. Diese sogenannten Co-Benefits werden in einem eigenen Kapitel genauer erklärt. Wenn die Biomasse nicht zu Biochar oder anderweitig weiterverarbeitet wird, dann zersetzt sie sich und der Kohlenstoff gelangt über die Verrottung als CO₂ und über die Vergärung als Methan wieder in die Atmosphäre. Es erscheint also eine sehr sinnvolle Massnahme diesen natürlichen Verrottungsprozess zu vermeiden und den Kohlenstoff in dieser Form weiter zu speichern.

Terminologie und Herstellungsprozesse

Wenn Biochar als Nebenprodukt einer Wärmeerzeugung oder Biomasseverstromungsanlage verstanden wird, dann wird es als CCUS bezeichnet (z.B. bei den Anlagen von E360, die Strom-geführt sind). Wenn allerdings Biochar als Hauptprodukt hergestellt wird, dann wird es weltweit, auch vom IPCC, als CCS (Carbon Capture and Storage) oder CDR Technologie klassifiziert. In diesem Bericht werden je nach Anwendung beide Definitionen verwendet. Biochar-Produktionstechnologien haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen, da Biochar vergleichsweise einfach herzustellen ist.

Die Herstellung erfolgt via **Pyrolyse** oder **hydrothermalen Carbonisierung (HTC)**.

HTC ist ein thermochemischer Umwandlungsprozess, bei dem Biomasse in Gegenwart von Wasser hohen Temperaturen (ca. 300-450°) und Drücken ausgesetzt wird. Diese Technologie ahmt den natürlichen Kohlebildungsprozess nach, allerdings in einem viel kürzeren Zeitrahmen. Während der HTC durchläuft die Biomasse verschiedene chemische Reaktionen, einschliesslich Hydrolyse, Dehydrierung und Polymerisation, die zur Bildung eines festen kohlenstoffreichen Materials führen, das als Hydrochar bezeichnet wird. HTC bietet mehrere Vorteile, wie die Möglichkeit, eine Vielzahl von Rohstoffen zu verarbeiten, insbesondere jedoch flüssige Biomasse aus z.B. Klärschlämmen oder Abwässern und das Potenzial, Biochar mit verbesserter Nährstoffbindung herzustellen (Röhrdanz et al. 2019).

Die **Pyrolyse** hingegen ist ein thermischer Zersetzungsprozess, der unter Entzug von Sauerstoff stattfindet. Biomasse wird auf hohe Temperaturen erhitzt, typischerweise zwischen 450°C und 950°C, was zur Freisetzung flüchtiger Verbindungen und zur Bildung von Biochar als fester Rest führt. Die Pyrolyse kann in drei Hauptarten unterteilt werden: langsame Pyrolyse, schnelle Pyrolyse und Vergasung. Langsame Pyrolyse beinhaltet langsame Erwärmungsraten und längere Verweilzeiten, was zu einer höheren Biochar-Ausbeute führt. Schnelle Pyrolyse verwendet schnelle Erwärmungsraten, was zu einer höheren Produktion von Bioöl zusammen mit Biochar führt. Die Vergasung ist ein partieller Verbrennungsprozess, bei dem ein Synthesegas aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und anderen Gasen sowie Biochar als Nebenprodukt entsteht. Während des Prozesses können je nach Technologie zusätzlich Strom, Wärme und Pyrolyse-Öl (Koppelprodukte) gewonnen werden, die massgeblich die Wirtschaftlichkeit bestimmen. Die Nutzung dieser Technologien hängt von Faktoren wie den Eigenschaften und verfügbaren Menge der Ausgangsstoffe (Abraum- oder Waldholz), den gewünschten Nutzungseigenschaften der Biochar und der Verfügbarkeit einer geeigneten Infrastruktur ab.

⁶ <https://www.biochar-industry.com/biochar/>

Als Grundstoffe für die Biochar-Herstellung können verschiedene Biomassen eingesetzt werden, die man in verholzte (A) und nicht verholzte Biomasse (B) einteilen kann. Zu A) gehören Bäume, Sträucher, Gräser usw. und zu B) Stärke oder Ölhaltige Biomasse, wie Energiepflanzen, z.B. Mais, Weizen und Sonnenblumen. Andere Stoffe können nicht so klar zugeordnet werden, z.B. besteht Gülle (Manure) oder Feststoffe von Tieren oder menschliche Fäkalien (Klärschlamm) und Abfallbiomasse aus verschiedenen Bestandteilen. Geringe Kunststoffverunreinigungen oder gewisse sortenreine Kunststoffe lassen sich auch pyrolysieren, aber Kunststoffgemische, insbesondere Kunststoffe mit Chlor, wie PVC führen zu problematischen Nebenprodukten. Das European Biochar Certificate (EBC 2020) publiziert für die EU folgende [Positivliste](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivliste_de_2022_v10_1.pdf)⁷ für erlaubte Biomasserohstoffe für die Herstellung von Biochar, welche auch in der Schweiz benutzt wird.

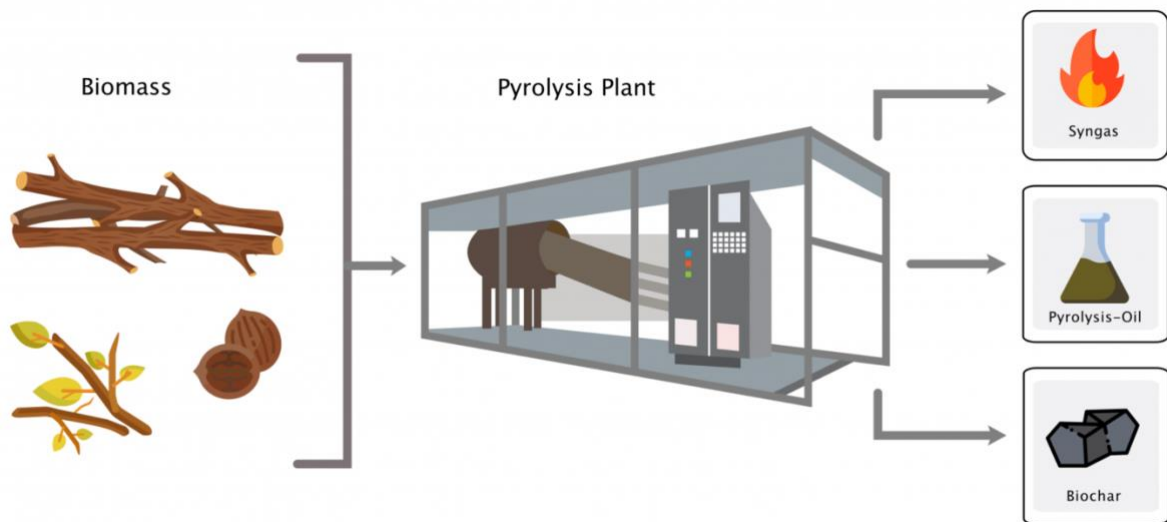


Abbildung 3: Pyrolyseprozess (<https://www.biochar-industry.com/biochar/>)

Die Qualität des Biochars und damit die Anwendung ist von vielen Faktoren abhängig. Das Ausgangsmaterial und die Verarbeitungstechnologie haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und die Umweltauswirkung des Endprodukts. Es sollten keine schädlichen Verunreinigungen wie Schwermetalle, Pestizide oder andere chemische Rückstände im Ausgangsmaterial enthalten sein. Wird Biochar einer landwirtschaftlichen Nutzung und der Ernährungskette zugeführt, so sind vor allem die schädlichen polyzyklischen aromatischen Kohlenstoffe (PAK) durch geeignetes Eingangsmaterial und einen konstanten und kontrollierten Prozess zu vermeiden. Die Erfüllung dieser Anforderungen und auch der Luftreinhaltewerte werden durch namhafte Hersteller garantiert, von unkontrollierten Kleinanlagen kann das nicht immer sichergestellt werden. Moderne Pyrolysewerke mahlen das Pyrolysegut durch anspruchsvolle Mahltechnik, um eine möglichst grosse und dadurch hohe reaktive Oberfläche zu erzeugen und damit die Effektivität zu erhöhen oder sogar zu ermöglichen, dass Biochar flüssig auf die Felder ausgebracht werden kann. Auch im Bereich HTC gibt es nun einige Pilotprojekte, wobei Erfahrungswerte für die Qualität der Biochar gesammelt werden (Mehli et al. 2021).

Anwendung

Biochar findet Anwendung in verschiedenen Bereichen wie Landwirtschaft und Städtebau (z.B. als Bodenverbesserer), Tierhaltung (z.B. als Futtermittelzusatz und als Ersatz für Antibiotika), Umwelttechnik (z.B. Abwasserreinigung, um Mikroplastik herauszufiltern), Energietechnik und als Werkstoff (z.B. für Innenwandverputz) (Cames et al. 2023), Zusatz in der Zement- und Stahlindustrie, sowie im Bau, bis hin zu schwarzem Farbstoff in der Kosmetik und Ernährungsindustrie.

In der **landwirtschaftlichen Anwendung** wird Biochar oft erst mit Nährstoffen versetzt, z.B. durch Einlegen in Gülle oder mikrobiell mit Milchsäure- oder Hefebakterien aktiviert. So können die Boden-,

⁷ https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivliste_de_2022_v10_1.pdf

Gülle- und Futterprozesse optimiert werden und dem Boden nicht nur Kohlenstoff zugeführt, sondern noch weitere Co-Benefits erreicht werden.

Weitere wichtige Anwendungen sind in der **Landschaftsgärtnerei**, wo mit Nährstoffen versetzte und in Böden eingebrachte Biochar als Kompost, Dünger oder als wasserspeicherndes Substrat für Stadtbäume dient und zusätzlich einen Kohlenstoffspeicher im Boden bildet.

Hersteller / Technologien im DACH-Raum

Die Hersteller von Biochar im DACH-Raum lassen sich grob in folgende drei Kategorien einteilen:

1. **Industrieller, energiegeführter Produktionsprozess:** Bei diesen Unternehmen steht die Energiegewinnung in Form von Wärme und Strom im Vordergrund und Biochar fällt als zeitlich variables Nebenprodukt an. Diese Anlagen sind meistens strom- oder wärmegeführt mit entsprechend geringerer Ausbeute an Biochar. Als Technologie werden oft Anlagen vom Marktführer Syncraft eingesetzt. Ein grosser Vorteil dieser Anlagen ist, dass sie über das Jahr betrachtet durch die drei saisonal verschiedenen und in beschränktem Mass variablen Nutzungsoptionen eine gute Auslastung erreichen, d.h. z.B. im Sommer keine grossen Wärmeüberschüsse erzeugen. Der Prozess ist deutlich komplizierter, teurer und die Biocharqualität (Thema PAK) ist nicht einfach zu steuern. Das Holzheizkraftwerk der Bioenergie Frauenfeld ist aktuell das einzige in der Schweiz produzierende Grossunternehmen für Biochar.
2. **Industrieller, materialgeführter Produktionsprozess:** Bei diesen Unternehmen steht die Materialproduktion von Biochar im Vordergrund, meist aus minderwertigem Abraum- oder hochwertigem Waldholz oder landwirtschaftlichen Restprodukten. Der Prozess wird materialgeführt. Als Nebenprodukt entsteht Prozesswärme, die für die eigene Prozessführung (Vortrocknung der Biomasse), sowie im Winter für Nahwärmeverbünde eingesetzt werden kann. Anlagenhersteller sind u.a.: CTS Carbon Technik Schuster, Biomacon, Pyreg und ETIA Ecotechnologies. Anlagenbetreiber und Biocharproduzenten in der Schweiz sind u.a.: [Lignocarbon](https://lignocarbon.ch/)⁸ und [Inkoh](https://inkoh.swiss/)⁹. Das aktuell neuste, sogenannte „vollintegrierte“ Werk betreibt Lignocarbon, die nebst der üblichen, ungemahlene Bigbag-Kohle, auch gemahlene, mikrobiell aktivierte Pflanzenkohle von der gleichen Produktionsstrasse anbietet.
3. **Bäuerliche Selbstverbraucher.** Einige Landwirte und genossenschaftliche Vereinigungen stellen dank eigenem Rohmaterial Biochar her, entweder zur eigenen Verwendung und / oder für den Verkauf an andere Landwirte oder Gartencenter in der Region. Beispiele sind: [Verora](http://www.verora.ch/), [APD](http://www.a-p-d.ch/pflanzenkohle/)¹⁰. Eingesetzt werden ausschliesslich materialgeführte Anlagetechnologien. Neuste Entwicklungen gehen auf noch kleinere (Hof)Einheiten zu. Wie hier die Qualitätssicherung sichergestellt werden kann, muss noch geregelt werden.

Die Kategorie der Hersteller ist massgeblich von der eingesetzten Technologie abhängig. Unten wird eine Veranschaulichung eines Anlagenherstellers [BIOMACON GmbH](https://www.biomacon.com/)¹¹ gegeben, welcher die Einteilung in Kleinanlagen (63 – 224kW) für landwirtschaftlichen, kommunalen Betriebe sowie bei Forstwirtschaft und Gewächshäusern, und Industrieanlagen (bis 500kW) für Kläranlagen, industrielle Betriebe und Herstellungsprozesse oder Wärme-Contractoren, vornimmt.

⁸ <https://lignocarbon.ch/>

⁹ <https://inkoh.swiss/>

¹⁰ <http://www.verora.ch/>, <https://www.a-p-d.ch/pflanzenkohle/>

¹¹ <https://www.biomacon.com/>

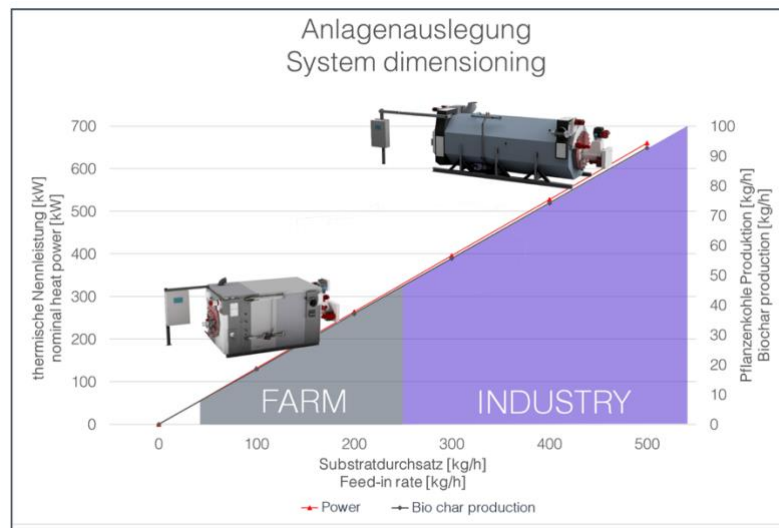


Abbildung 4: Biochar Herstellungsanlagen ([Link](#) auf Webseite Biomacon)

2.2.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Haupttreiber

Die Herstellung von Biochar und verschiedene Formen ihrer Anwendung können der Atmosphäre über lange Zeiträume (d.h. "dauerhaft") Kohlendioxid entziehen, indem der ursprünglich in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in Biochar umgewandelt wird und in stabiler Form in der Biochar oder ihrer Anwendungsform verbleibt und nicht wieder in CO₂ oder Methan umgewandelt und in die Atmosphäre zurückgegeben wird.

Das Biochar-Produktsystem umfasst die Lieferkette für Biomasse, die Umwandlung von Biomasse zur Herstellung von Biochar und Nebenprodukten (in der Regel gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe) sowie die Anwendung von Biochar. Je nach Anwendung können bestimmte Nebeneffekte auftreten - im Falle der Verwendung von Biochar als Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft gehören zu diesen Nebeneffekten die Veränderung der Albedo der Landoberfläche, die Verringerung der N₂O-Emissionen aus dem Boden und eine potenzielle Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge oder ein geringerer Bedarf an Düngemitteln. Meistens hängen solche Nebeneffekte von lokalen Randbedingungen wie Bodentyp oder -qualität ab, so dass es schwierig ist, sie allgemein oder durchschnittlich zu quantifizieren.

Um das CDR-Potenzial und die Wirksamkeit der Biocharanwendung zu quantifizieren, müssen die Klimaauswirkungen aller zugehörigen Prozessen berücksichtigt werden. Die Emissionen anderer Stoffe als Treibhausgase und die Ressourcennutzung müssen für die Quantifizierung weiterer Umweltbelastungen berücksichtigt werden. Die Bereitstellung von Rest- oder Abfallbiomasse kann als "belastungsfrei" angesehen werden, während die Umweltbelastungen der Biomasseproduktion (einschließlich der direkten und indirekten Landnutzung und der damit verbundenen Klimaauswirkungen) im Falle der Verwendung von speziellen Pflanzen oder Holz berücksichtigt werden müssen.

Bei der Bilanzierung der Klimaauswirkungen und anderer Umweltbelastungen muss die Multifunktionalität der Biocharproduktionsverfahren (Pyrolyse, Vergasung, Torrefizierung, hydrothermalen Carbonisierung) berücksichtigt werden, d. h. die Tatsache, dass neben der Biochar auch Kohlenwasserstoffe und andere Produkte erzeugt werden, die nützliche Produkte mit Marktwert darstellen. Diese Kohlenwasserstoffe können in Wärme und Elektrizität umgewandelt werden, die teilweise zur Bereitstellung der für die Trocknung und Umwandlung der Rohstoffe benötigten Energie verwendet werden. Überschüssige Wärme und Elektrizität können an externe Nutzer geliefert werden. Abbildung 5 zeigt ein beispielhaftes Prozesssystem für die Anwendung von Biochar auf dem Boden,

einschließlich der wichtigsten Prozesse und Fragen für die Kohlenstoffbilanzierung und eine allgemeinere Umweltbewertung sowie potenzielle Nebeneffekte.

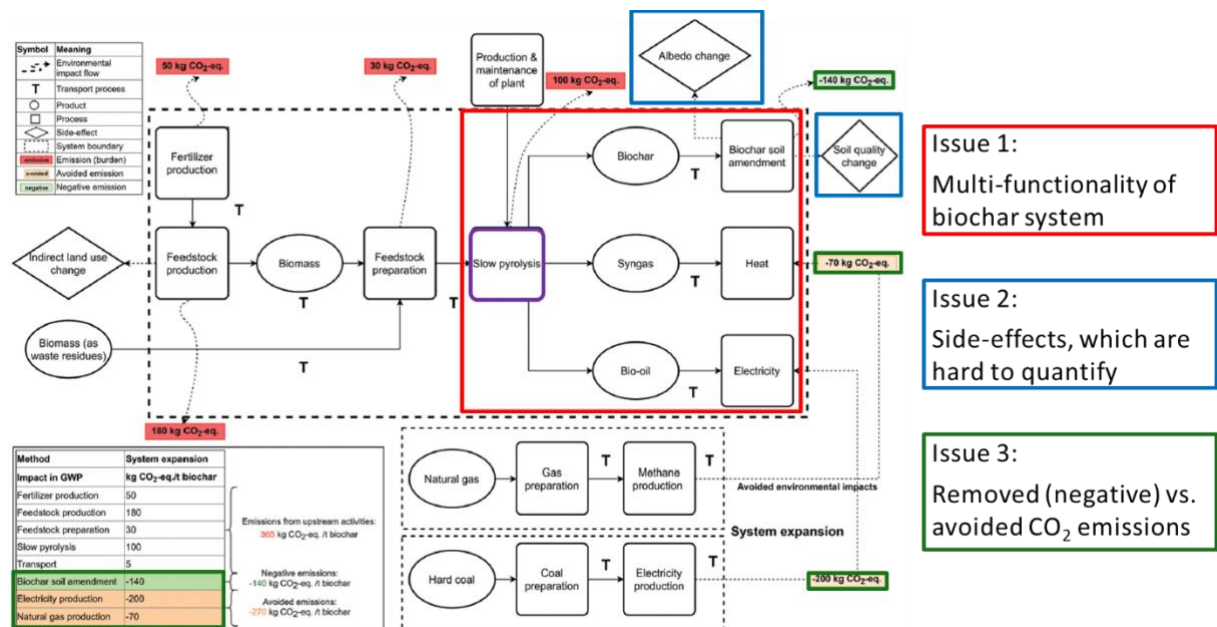


Abbildung 5: Beispielhaftes Prozesssystem einer typischen Biochar-zu-Boden-Prozesskette, das die wichtigsten Aspekte der (Kohlenstoff-)Bilanzierung veranschaulicht; nach Terlouw et al. (2021).

Die Multifunktionalität des Biocharherstellungsprozesses kann auf verschiedene Weise gehandhabt werden: Eine Möglichkeit besteht darin, jedem der Nebenprodukte bestimmte Anteile an den gesamten Umweltbelastungen des Biomasse-zu-Biochar-Produktionsprozesses und aller Prozesse vor der Biomassekonversion (z.B. Biomasseproduktion und -bereitstellung) zuzuweisen ("umzulegen") - entweder auf der Grundlage ihres Energiegehalts, ihrer Masse oder der von ihnen generierten wirtschaftlichen Erträge; eine andere Möglichkeit besteht in der Annahme, dass Nebenprodukte (hier: überschüssige Wärme und Elektrizität aus der Umwandlung von Kohlenwasserstoffen) andere Arten der Wärme- und Elektrizitätserzeugung, z.B. marginale Produktionstechnologien, ersetzen und somit vermeiden. Die Umweltbelastungen der substituierten oder vermiedenen Erzeugung würden als Umweltnutzen, d.h. als Gutschriften mit negativem Vorzeichen, angerechnet und von den Gesamtbelastungen des Biochar-Produktsystems abgezogen werden.

Solche vermiedenen Umweltbelastungen (insbesondere Klimaauswirkungen) sollten immer getrennt von der Kohlenstoff-Entfernung aus der Atmosphäre durch die Biocharproduktion und -anwendung ausgewiesen werden (Terlouw, Bauer, et al. 2021). In Bezug auf die Klimaauswirkungen vor allem aus zwei Gründen: Erstens besteht ein grundlegender Unterschied zwischen der aktiven Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre, die zu einer Verringerung der atmosphärischen Temperatur führt, und der Verringerung von Emissionen aus anderen Quellen, die "nur" die weitere Erwärmung verringert; Zweitens hängen reduzierte Emissionen/Belastungen immer von einer Basisannahme bezüglich der substituierten Produkte oder Dienstleistungen ab. Diese Annahme hängt von fallspezifischen Randbedingungen ab und kann sich je nach geografischem Gebiet im Laufe der Zeit ändern. Am wichtigsten sind im Hinblick auf die Gesamtauswirkungen auf den Klimawandel die potenziell substituierte Wärme- und Stromversorgung und deren Treibhausgasemissionsintensität. Die Nettowirksamkeit der Kohlenstoff-Entfernung durch Biochar hängt mehrheitlich davon ab, welcher Anteil des Kohlenstoffs aus der Biomasse wirklich dauerhaft in Form von Biochar in der Erde verbleibt (Beispiel Biochar im Boden). Das hängt von der Art der Biomasse, der Pyrolysetechnik und der Temperatur sowie von der Art und Temperatur des Bodens ab.

2.2.3 Co-Benefits

Biochar ist nebst dem Holzbau mit seinen Substitutionseffekten eine der wenigen NET mit zusätzlichen Vorteilen, den sogenannten Co-Benefits. Diese wurden in einem ausführlichen Literatur-Review vom September 2021 genau untersucht (H.-P. Schmidt et al. 2021). Die Co-Benefits sind sehr wichtig, da sie einerseits die Kosten reduzieren, indem der Mehrwert verkauft werden kann und andererseits zusätzliche positive Effekte bringen, die die Nutzung attraktiv machen, die Akzeptanz erhöhen und gegenüber dem Risiko (z.B. PAK) positiv zu bewerten sind. Einige Co-Benefits haben positive Auswirkungen auf die Absorption oder die Emission von Treibhausgasen, sie sind also zusätzlich klimapositiv. Ein ausführlicher Bericht des Bundesrats über die Schweizer Böden zeigt, dass diese über die letzten Jahrhunderte durch landwirtschaftliche Nutzung massiv an organischem Material, also Kohlenstoff verloren haben, und zwar teilweise bis zu 78% (Bundesrat 2023). Biochar könnte also ein Mittel sein, um Böden wieder zu regenerieren und gleichzeitig Kohlenstoff zu speichern, eine andere Variante ist der Humusaufbau. Beide können auch kombiniert werden. Folgende Co-Benefits werden in der Literatur genannt (Haubold-Rosar et al. 2016; Lin et al. 2023; H.-P. Schmidt et al. 2021). Die HTC Methode bietet noch weitere Co-Benefits (Mehli et al. 2021).

Direkt klimarelevante Co-Benefits

- Reduktion von Lachgas - Emissionen aus den Böden
- Bindung von weiteren Mikroben und anderer Biomasse im Boden so dass mehr C gespeichert wird
- Reduktion von Transportvolumen durch dezentrale Verpressung und damit Aufkonzentration von nassen Abfällen, wie Gülle oder Klärschlamm und damit Einsparung von Treibstoffen (HTC)
- Reduktion von Methan-Emissionen,
 - aus Gülle und Kläranlagen
 - durch Futterbeimischungen bei der Verdauung von Wiederkäuern
 - aus Böden (bewiesen nur bei Nassanbau, wie z.B. Reis)

Weitere Co-Benefits

- verbesserte Futteraufnahme bei Tieren
- verbessertes Pflanzenwachstum / Mehrertrag in Landwirtschaft, vor allem wenn Biochar vorher angereichert wurde, z.B. durch Gülle oder Urin. Die Wirkung ist abhängig vom Bodentyp
- Förderung der Wurzelbildung, dadurch z.B. verbesserte Phosphoraufnahme
- Speicherung von Wasser in Böden (allerdings Beimischung grosser Mengen Biochar nötig)
- Wertvoller Unterboden beim Anbau von städtischen Pflanzen, durch Speicherung von Nährstoffen und Wasser, führt z.B. zu verbessertem Baumwachstum bei Nutzung im Wurzelraum
- Bindung von schlechten Gerüchen, z.B. in der Abwasserreinigung
- Bindung von toxischen Stoffen (Schwermetalle), wie Blei, Chrom oder Kupfer
- Verbesserung der mechanischen, thermischen und elektromagnetischen Eigenschaften von Beton.
- Einfachere Rückgewinnung von wertvollen Ressourcen, wie Phosphor und Stickstoff (HTC)
- Hochwertige Speicherung von Energie, die später wieder genutzt werden kann – Verbrennung der Kohle) HTC
- Abbau von schädlichen Plastikresten in der Biomasse, die sonst z.B. im Kompost oder in den Vergärungsresten bleiben würden.

Zusätzlich wichtig ist, dass die Herstellung von Biochar nur dort erfolgen sollte, wo die beim Prozess entstehende Restwärme genutzt werden kann und / oder zusätzlich Strom erzeugt wird. Bei der HTC können die Prozessschritte getrennt werden und ein Teil dezentral und ein anderer Teil zentral ausgeführt werden, so dass die Anforderungen an Strom und Wärmeerzeugung und Nutzung optimiert werden können.

2.2.4 Risiken

Es ist bei den Risiken zu unterscheiden, wo die Biochar eingesetzt wird. Meist ist die Nutzung von Biochar sehr sicher, z.B. als Zementzusatz, im Bau oder bei Stadtbäumen. Beim Einsatz von Biochar in landwirtschaftlichen Böden ist es dagegen wichtig, das Risiko schädlicher Auswirkungen auf bodenphysikalische, -chemische und biologische Eigenschaften zu vermeiden. Für die Bodenverbesserung fehlen Langzeitstudien (zumindest für europäische Böden), um zu belegen, dass der Einsatz von Biochar keine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellt und eine wissenschaftlich fundierte Obergrenze wurde noch nicht festgelegt (Erreichung des Sättigungsgrades). Das BAFU hat zu diesem Thema ein Faktenblatt veröffentlicht (Bundesamt für Umwelt (BAFU) et al. 2023). Nachfolgend sind die wichtigsten Risiken zusammengefasst (Haubold-Rosar et al. 2016; Xiang et al. 2021).

Schadstoffeintrag

Es ist wichtig, negative Auswirkungen durch Schadstoffeinträge und erhöhte Stofffreisetzung zu vermeiden, um Wasser, Luft und die Gesundheit von Pflanzen, Tieren und Menschen zu schützen. Eine gezielte Verbesserung der Umweltverträglichkeit des Einsatzes von Biochar in Böden kann durch die Verwendung von schadstoffarmen und homogenen Ausgangsstoffen bei der Herstellung erreicht werden. Bei allen Herstellungsverfahren besteht das Risiko der Bildung organischer Schadstoffe wie PAK und Dioxine bei der Pyrolyse sowie leicht flüchtiger Verbindungen, insbesondere bei der hydrothermalen Carbonisierung. Durch eine konstante, kontrollierte Prozessführung kann die Entstehung und unkontrollierte Freisetzung dieser Schadstoffe vermieden werden. Es ist notwendig, entsprechende Technologien einzusetzen und weiterzuentwickeln und vor allem unabhängig durchgeführte Kontrollen des chemischen Aufschlusses, was sich nur die industriellen Anlagen leisten werden können, durchzuführen (Haubold-Rosar et al. 2016).

Boden-pH-Wert, Nährstoff-Ungleichgewichte und Ecotoxicity:

Pyrolysekohlen haben in der Regel pH-Werte über 7 und können zu einer Alkalisierung und einer erhöhten Säurepufferung in den behandelten Böden führen. So kann der alkalische Charakter von Biochar den pH-Wert des Bodens verändern. Eine übermäßige oder unsachgemäße Anwendung von Biochar kann die Bodenfruchtbarkeit und die Nährstoffverfügbarkeit beeinträchtigen. Darüber hinaus kann Biochar Nährstoffe binden und ihre Freisetzung behindern (Haubold-Rosar et al. 2016). Biochar kann potenziell ecotoxisch wirken, z.B. auf Regenwürmer oder auch Mikroorganismen.

Kohlenstoffemissionen: Die Herstellung von Biochar erfordert neben dem meist fossilen Materialtransport von und ab Werk, Energie in Form von Wärme (meist eigene Abwärme) und Strom (Materialförderung). Wenn diese Energie aus fossilen Brennstoffen stammt, kann sie zu Treibhausgasemissionen beitragen und den Klimawandel verschärfen. Darüber hinaus könnten unsachgemäße Pyrolyseprozesse oder Biochar-Nutzung den gespeicherten Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigeben.

Umweltzerstörung: Eine gross angelegte Biochar Produktion könnte theoretisch zu einer erhöhten Nachfrage nach Biomasse führen, was im schlimmsten Fall zu Entwaldung oder Umleitung landwirtschaftlicher Ressourcen führen würde. Solche Tätigkeiten können Ökosysteme stören, die biologische Vielfalt verringern und negative Folgen für die Landnutzung und die Nahrungsmittelerzeugung haben.

Um diese Risiken zu mindern, ist es von entscheidender Bedeutung, unabhängig kontrollierte Verfahren bei der Biochar Produktion zu befolgen, die Verwendung sauberer Rohstoffe aus nachhaltigem Anbau zu gewährleisten, angemessene Bodenversuche durchzuführen und Biochar in angemessenen Mengen auszubringen. Darüber ist eine strenge Überwachung notwendig und weitere Forschung, um die langfristigen Auswirkungen der Biochar Verwendung auf die Bodengesundheit, die Wasserqualität und die Ökosystemdynamik zu verstehen.

2.2.5 Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber

Kosten

Biochar ist eine der wenigen CDR Technologien, bei der durch die Co-Benefits neben Kosten auch Einnahmen entstehen können. Somit müssen diese für den Vergleich mit den anderen Technologien auch berücksichtigt werden. Daher muss eine Unterscheidung in die Herstellungskosten für Biochar (sowohl Investitions- als auch laufende Kosten) und der Einnahmeseite erfolgen, die aus dem Verkauf von Biochar und den Nebenprodukten (z.B. Wärme, Strom, Gas) besteht. Abhängig von der Möglichkeit diese zu monetarisieren, ergeben sich die Endkosten der Biochar. Es werden zwei Varianten unterschieden: In Variante 1 kann Biochar nicht verkauft werden, sondern dient nur der Speicherung von CO₂ in dafür vorgesehenen Lagerstätten. Bei Variante 2 können alle Co-Benefits verkauft werden und Biochar dient als wertvolles Produkt, z.B. in der Landwirtschaft oder im Bau. Je nach Variante variieren die resultierenden Kosten pro t CO₂ der durch Biochar erzeugten negativen Emissionen sehr stark und sind abhängig von der spezifischen Nutzung. (Differenz der Kosten und Einnahmenseite). Ausserdem unterscheiden sich die Kosten stark, je nachdem welche Produktionsform vorliegt: a) industrieller, energiegeführter Produktionsprozess b) industrieller, materialgeführter Produktionsprozess, c) bäuerliche Selbstverbraucher. Zusätzlich gibt es für die HTC Anlagen noch mal andere Nebenprodukte und Überlegungen als für Pyrolyseanlagen. Die lange Liste der Co-Benefits zeigt, wie komplex es ist, die wahren Kosten und möglichen Einnahmen vorauszusagen. Da mit HTC z.B. Phosphor zurück gewonnen wird, kann dieser Prozess allein dafür bei entsprechendem Phosphorpreis lukrativ sein.

Derzeit befinden sich die meisten grösseren Schweizer Produktionsanlagen in einem sehr frühen Stadium der Produktion, d.h. die Anlagen laufen zum grossen Teil noch nicht optimal, z.B. müssen die Anlagen immer wieder ausgestellt werden, um Prozesse noch zu optimieren. Daher war es uns nicht möglich für das Projekt konkrete Schweizer Herstellungs-Kosten zu erhalten, da diese derzeit noch zu sehr schwanken, bzw. von den hohen Wartungs- und Installationskosten dominiert werden. Es ist aber zu erwarten, dass sich das in den nächsten Jahren ändert und es dann verlässliche Daten zu den Herstellungskosten geben wird (Mehli et al. 2021). Das wird ein Hauptfokus im weiteren Verlauf des SP3 sein.

Aus der Literatur gibt es verschiedene Angaben zu den Kosten, die aber sehr breit gestreut und damit nur bedingt aussagekräftig sind (A). Zusätzlich kann man im Internet aktuelle Preise für Biochar finden, die mehrheitlich in kleinen noch nicht industriell optimierten Anlagen produziert wird (B).

A) **Kosten** für die **Herstellung** einer Tonne Biochar (Speicherung einer Tonne CO₂):

Laut dem Bericht von Cames et al. haben internationale Studien Kosten von 8-300 US\$/t CO₂ für die Herstellung und den Einsatz von Biochar angegeben (Cames et al. 2023). In der Schweiz werden die Schätzungen für das Jahr 2030 auf 30 CHF/t CO₂ und für das Jahr 2050 auf 10 CHF/t CO₂ beziffert. Andere Studien haben die Kosten auf 10-135 CHF/t CO₂ geschätzt, abhängig vom Pyrolyseverfahren, der Herkunft der Biomasse und der Qualität der Biochar. Somit ergibt sich eine grosse Unsicherheit der Kosten CHF/t CO₂. Zusätzlich von der Herstellung hängen die Gesamtkosten auch von den Kosten der Speicherung ab. Diese sind sehr anders, ob Biochar in den Boden eingebracht oder im Bau verwendet wird. Neue Gesetze schreiben für die Verwendung auf Landwirtschaftsland einen Grundbucheintrag vor, dieses kostet je nach Gemeinde unterschiedlich, stellt aber neben einer finanzielle auch noch eine administrative Hürde da. Hier brauchen wir noch weitere Forschung.

B) **Erlöse** aus dem **Verkauf** von Biochar (in Nischenmärkten in kleinen Mengen)

In der Schweiz liegen die Preise für Biochar je nach Verwendungszweck und Qualität zwischen etwa 500 CHF (unbehandelte, unspezifische Biochar) bis 2'500 CHF (mikrobiell aktivierte Futtermittelkohle) pro Tonne. Internetrecherchen auf Verkaufsportalen zeigen folgende derzeitige Marktpreise für Biochar:

Produkt	Verkaufsangaben für 1000l	Preis pro Tonne Biochar
Aktivierter Biochar in Komposterde	70% Biochar für 699 CHF	3300 CHF / to
Biochar pur, nicht aktiviert	100% Biochar für 370 CHF	1200 CHF/ to
Futterfähiger Biochar	Futterkohle gemahlen 740 CHF	2400 CHF / to

*Annahme einer Dichte von rund 0.3 kg / l

Quellen: <https://www.swiss-biochar.com/produkte/>, <https://agrashop.ch/Verora-Futterkohle-gemahlen-Big-Bag-1.0m3/AGS1028792>

Diese Erlöse spiegeln nicht die Herstellungskosten oder die Preise für die NET-Technologie wieder, sondern sind eher durch nachgelagerte Prozesse bestimmt, die mit den Co-Benefits zusammenhängen, z.B. Herstellung Futterkohle und können sehr unterschiedlich sein. Es ist anzunehmen, dass die Erlöse also der Marktpreis von Biochar deutlich abnehmen dürfte, sobald die Produktion industriell skaliert wird.

Potentiale

Biochar hat bezüglich des Herstellungsprozesses bereits den Praxiseinsatz erreicht (TRL 9), aber die Verfügbarkeit von Pyrolyseanlagen und Biomasse ist derzeit immer noch begrenzt. Ein ausführlicher Beitrag hierzu ist im CDR Report der Stiftung Risiko-Dialog auf Seite 41-42 zu finden (Beuttler et al. 2019). Laut diesem liegt das maximale Marktvolumen bei 600'000 t pro Jahr (Nutzung), während 900'000 t pro Jahr hergestellt werden könnten, also mehr als der Markt schätzungsweise aufnehmen kann. Durch die vielen Co-Benefits geht man dabei von null oder sogar negativen Kosten aus. Dank der hohen weiteren positiven Klimaeffekte und z.B. der Substitution von leichtem Heizöl kann diese Menge rund 18% der Schweizer Emissionen kompensieren. In einer neueren Studie schätzen Brunner und Knutti (2022) das direkte Senkenpotential von Biochar auf 1,5 Mio. t CO₂e.

Potential für die Nutzung

Biochar wird als NET in der Schweiz noch nicht in signifikanter Masse eingesetzt. Die Hauptnutzung von Biochar erfolgt derzeit in der Landwirtschaft als Bodenverbesserer und weniger als Materialzusatz beim Bauen oder anderen Anwendungen.

Derzeit wird die Nutzung in der Landwirtschaft durch zwei Regelungen erschwert: Biochar zur Bodenverbesserung wird rechtlich als Dünger eingestuft und die Menge von 8 Tonnen pro Hektar und Periode darf nicht überschritten werden (Bundesrat 2012, Anhang 3). Ausserdem ist für eine Zertifizierung die Eintragung ins Grundbuch notwendig (Bundesrat 2012, Art. 8a; siehe auch Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2021), eine je nach Kanton mehr oder weniger aufwendige und teure Massnahme, die viele Landwirte abschreckt.

Derzeit wird die geologische Lagerung von Biochar als CO₂ Senke nicht diskutiert (Cames et al. 2023). Die Verwendung von Biochar in anderen Anwendungen, z.B. in der Tierhaltung, in der Umwelttechnik, in der Energietechnik und als Werkstoff wird weiterhin erforscht und macht derzeit nur einen sehr kleinen Anteil der Nutzung aus.

Insgesamt gibt es viel Forschung und Innovationen bezüglich der Nutzung von Biochar beim Bauen, zum Beispiel als Zusatzstoff im Beton (Singhal 2023), aber auch als Grundmaterial für Dämmstoff z.B. vom Startup [Kohlenkraft](#). Die Potentiale für diese Nutzung sind schwer abzuschätzen, da sich die meisten Projekte noch in der Pilotphase befinden. Laut dem Verein «Biochar-zero» von Biochar Experten können solche Baumaterialien auch mit dem European Biochar Certificate (EBC) zertifiziert werden. Die Biochar muss dabei nur der tiefsten Qualitätsklasse entsprechen, solch eine Nutzung könnte also sehr interessant sein, um diverse Ausgangsmaterialien für die Biochar Herstellung zu nutzen.¹²

Ein Hindernis für die schnelle Skalierung der Biochar Produktion ist die begrenzte Verfügbarkeit von den Ausgangsmaterialien, vor allem wenn es sich um Holz handelt. Biomasse ist derzeit als

¹² <https://biochar-zero.com/construction-industry/biochar-in-concrete/>

Energieträger sehr begehrt und es ist davon auszugehen, dass die Nachfrage in Zukunft im Rahmen der Decarbonisierung des Wärmemarktes auch noch steigen wird. Biomasse ermöglicht es, fossile Rohstoffe mit Kohlenstoffanteil wie Kohle, Öl oder Gas für die Wärmeerzeugung zu ersetzen. Die Biomasse aus nicht sägefähigem Kronenmaterial für Waldholzschnitzel ist dabei besonders begehrt und konkurriert mit der Verwendung als naturbelassenes Ausgangsmaterial für Biochar für die landwirtschaftliche Anwendung. Sägefähiges Rundholz für den Holzbau konkurriert nur mit Biochar, wenn die Rundholzpreise weiter sinken. Holz ist generell als Grundstoff sehr begehrt, da es relativ trocken ist und einfach transportiert und gelagert werden kann.

Die breit anerkannte Kaskadennutzung fordert zudem, Holz vorwiegend zuerst im Bau und erst später beim Rückbau der Produktion von Biochar, bzw. der thermischen Verwertung zuzuführen.

Potential für die Herstellung 2030

Um das Potential der Biochar Produktion für die Schweiz abzuschätzen, muss das nachhaltig verfügbare Potential an geeigneter und nicht mit anderen Verwertungen konkurrenzierenden Biomassen abgeschätzt werden. Nach der Studie von Thees et al. werden die Biomassequellen in verholzte und nicht verholzte Biomassen eingeteilt und ein zu der derzeit genutzten Masse zusätzlich nutzbares Potenzial von 2,8 Mio. Tonnen Trockensubstanz (TS), (= 44,2 Petajoule) pro Jahr für die Schweiz errechnet (Thees et al. 2017).

Mittels folgender Rechnung kann die Menge CO₂ berechnet werden, die sich mittels Biochar abtrennen lässt: Grob sind es 2,8 Mio. Tonnen Trockensubstanz aus 1/3 holziger Biomasse (Waldenergieholz, Flurholz, Restholz und Altholz). Rundet man auf 3 Mio. Tonnen auf und nimmt an, dass der Kohlenstoff-Anteil bei ca. 50% der Trockensubstanz liegt (konservative Schätzung) und bezieht die Effizienz einer Pyrolyseanlage von 60% ein, so erhält man 0,9 Mio. Tonnen Biochar. Besteht die Biochar aus 100% Kohlenstoff, dann ergeben sich bei der Verbrennung 3,3 Mio. Tonnen CO₂ aus 0,9 Mio. Tonnen reinem Kohlenstoff (3,6 Umrechnungsfaktor C zu CO₂). Der stabile Kohlenstoffanteil, welcher „dauerhaft“ im Boden verbleibt, liegt bei ca. 75%. Somit hätte man ein jährliches Einsparpotenzial bzw. Senkenpotential von ca. 2,25 Mio. Tonnen CO₂.

Diese Zahlen stimmen mit den Angaben in einer Veröffentlichung des BAFU überein. Laut Bundesamt für Umwelt beläuft sich das Einspar- bzw. Senkenpotenzial auf 2,2 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr, wenn man landesweit alle verfügbare Trockenbiomasse als Biochar in die Böden einbringt (Jakob 2022). Das genaue Potenzial der großtechnischen Produktion und des Einsatzes von Biochar ist noch nicht vollständig geklärt. Die Unterschiede in den Berechnungen basieren auf verschiedenen Ausgangsbedingungen und der Art der Biomasse, die eingesetzt wird und ob dabei zum Beispiel Abfall eingesetzt wird oder gezielter Anbau erfolgt. In einer neueren Studie von Brunner und Knutti (2022) werden die Potentiale für die Schweiz etwas geringer eingeschätzt mit 1.5 Mt CO_{2e}.

In der Realität wird der Wettbewerb besonders um das Drittel der verholzten Biomasse gross sein und damit allenfalls die Produktionsmenge verkleinern. Grund dafür ist der Zeit- und Preisfaktor. Verholzte Biomasse wird wegen dem hohen Energiegehalt bis 2030 nahezu vollständig direkt dem Wärmemarkt zugeführt und über langfristige Verträge gebunden und steht dadurch der Pyrolyse nur bedingt zur Verfügung. Unser Implementierungspartner Thomas Fedrizzi sagt dazu „Stand heute ist Pflanzkohle ein neues Absatzsegment für die Waldwirtschaft, weil noch nicht alles nichtsägefähige Waldholz in den Energiekreislauf geht. Dies wird in 2030 anders sein. Andererseits kostet Biochar für die breite landwirtschaftliche Anwendung infolge des aufwändigen Prozesses zu viel, als dass es in Massen gekauft werden wird bzw. dass für Waldholzschnitzel für die Pyrolyse so viel bezahlt werden kann, wie für Energieschnitzel. Die Konkurrenz von Wärmeproduktion im Vergleich zur CO₂-Speicherung wird weiter gross bleiben.“

Potential für die Herstellung 2050

Es ist wichtig zu beachten, dass das Potential für Biochar in der Schweiz von verschiedenen Ungewissheiten und dynamischen Faktoren abhängt, z.B. von den Zielen unserer Gesellschaft, wie Biomasse genutzt wird, von den gemeinsamen Anstrengungen von Politikern, Forschern, Unternehmern und der Bereitschaft der Landwirtschaft, nachhaltige Praktiken anzuwenden. Es liegt

daher in unserer Hand, wie stark sich das Potenzial bis 2050 entwickelt. Z.B. werden derzeit die menschlichen und tierischen Ausscheidungen noch wenig genutzt oder auch kaum schnellwachsende Pflanzen speziell zur Herstellung von Biomasse angebaut. Man kann also davon ausgehen, dass die verfügbaren Mengen deutlich gesteigert werden könnten, wenn die richtigen Rahmenbedingungen vorliegen. Eine Abschätzung kann nur über Szenarien durchgeführt werden, die im nächsten Projektabschnitt geplant sind.

Wichtigste Treiber

Derzeit sind die Haupttreiber der Kosten und Potentiale von Biochar die folgenden:

- Verbesserung und Professionalisierung der Anlagenhersteller, Konsolidierung des Marktes, so dass er weniger unübersichtlich ist.
- Unsichere Entwicklung des Biomasse Marktes und der Kosten von Biomasse. Diese wird beeinflusst durch die Nachfrage nach Biomasse aus anderen Bereichen und auch z.B. durch Wetter oder Schädlingsbefall, wenn plötzlich viel Holzabfall ungeplant anfällt.
- Zulassung und Akzeptanz von alternativen Ressourcen als Ausgangsstoff, wie z.B. Gülle oder Lebensmittel-Abfälle oder Fäkalien Schlamm aus Abwasseranlagen.
- Akzeptanz in der Landwirtschaft hängt vor allem vom Preis und der Genehmigungsverfahren und auch der Zertifizierungsverfahren z.B. Bio ab. Ausserdem natürlich von den fühlbaren positiven Eigenschaften, die unter Umständen andere Kosten senken (Bewässerung, Düngung usw.
- Konstante Prüfung der Qualität der Biochar und klare Zertifizierung von bestimmten Qualitäten für bestimmte Nutzung.
- Vergütung der CO₂ Speicherung durch Zertifikate
- Unterstützung von Biochar in der Landwirtschaft durch die Schweizer Administration, durch die Festlegung von Klaren Nutzungsempfehlungen (Mengen und Qualität) und Nutzergruppen
- Vereinfachung von Prozessen – z.B. Weglassen der Eintragung im Grundbuchamt, dafür Einführung eines einfachen Registers.
- Zusammenschluss von Herstellern und Nutzern in Vereinigungen, wie z.B. Charnet, die die Nutzung vorantreiben und die Möglichkeiten bekannter machen.
- Einführung und Information von Biochar in den entsprechenden Ausbildungsberufen, so dass die Nutzung bekannter wird.
- Biochar ist günstiger, einfacher, ungefährlicher und effizienter für Speicherung von Carbon, da nicht erst CO₂ hergestellt wird, welches dann umständlich wieder eingelagert werden muss. Carbon wird hier ohne Umwege und ohne die Reaktion mit Sauerstoff gespeichert, so dass das Endprodukt rund 1/3 weniger Gewicht und viel weniger Volumen hat (da Feststoff im Vergleich zum Gas) und damit leichter gelagert und transportiert werden kann.
- Mitigation through biochar will be greatest where biochar is applied to responsive soils (acidic, low fertility), where soil N₂O emissions are high (intensive horticulture, irrigated crops), and where the syngas co-product displaces fossil fuels) (Nabuurs et al. 2023).

Nachgelagert, also wenn Biochar dann wirklich nachgefragt und hergestellt wird, dann ergeben sich folgende weitere Treiber:

- Die fixen Kosten hängen vor allem von der Grösse und Professionalität der Anlagen ab, d.h. es sind noch mal deutliche Skaleneffekte zu erwarten.
- Die operationellen Kosten hängen von der Ausgangssubstanz (Kosten und Beschaffenheit) zusammen, und dann natürlich auch hier von den Skaleneffekten. Gülle z.B. ist zwar günstiger, muss aber erst entwässert werden. Hier aber gibt es auch schon technische Lösungen und mit der Masse sind auch hier starke Preissenkungen zu erwarten.
- Einnahmen hängen davon ab, inwieweit die Benefits wahrgenommen, bzw. reale Einsparung durch den Einsatz von Biochar erreicht werden, z.B. Tiergesundheit. Je nachdem könnte die Zahlungsbereitschaft im Bausektor sogar höher liegen, als in der Landwirtschaft. Das ist auch abhängig von den Vorschriften zur CO₂ Vermeidung im Bausektor.

2.2.6 Relevante Akteure

In der Schweiz sind sehr viele verschiedene Akteure im Bereich Biochar aktiv. Die folgenden Akteure sind besonders wichtig, weitere allgemeinere Akteure sind im Abschnitt 3.1 genannt und in unserer Akteursliste zu finden.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) und BLW (Bundesamt für Landwirtschaft): Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Regulierung und Überwachung der Erzeugung und Verwendung von Biochar. Darüber hinaus unterstützt das BAFU Forschungs- und Entwicklungsinitiativen im Zusammenhang mit Biochar und anderen Klimaschutztechnologien. Im Inland gibt es derzeit noch keine grösseren Biochar-Lagerstätten. Im Ausland können nur geologische Speicher im Rahmen des Kompensationsinstruments nach dem CO₂-Gesetz als CO₂-Senkenleistungen anerkannt werden, da etablierte Mess- und Kontrollmechanismen fehlen. Dennoch unterstützt die Schweizer Regierung Biocharprojekte im Ausland, beispielsweise im Rahmen des REPIC-Projekts, das die Förderung erneuerbarer Energien, Energieeffizienz und Ressourceneffizienz in Entwicklungs- und Transitionsländern zum Ziel hat (Cames et al. 2023).

Die Forschung wird an mehreren Institutionen durchgeführt, darunter Agroscope, Fibl, WSL, HES-SO und HEPIA Genf. Darüber hinaus arbeiten Lignocarbon, IWB, Verora, AgroCO₂ncept und Ökozentrum an der Entwicklung und Erprobung von industriellen Pyrolysetechnologien zur Pflanzenverkohlung. Lignocarbon hat schon viel Erfahrungen machen können. Speziell Agroscope führt Studien über die Auswirkungen von Biochar auf die Bodenqualität, die Pflanzenproduktivität und den Klimaschutz durch. Agroscope bietet auch Empfehlungen und Leitlinien für Landwirte und politische Entscheidungsträger in Bezug auf die Verwendung von Biochar.

Die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH Zürich), ZHAW, Ökozentrum Langenbruck und anderer Hochschulen erforschen aktiv Biochar und ihr Potenzial für Kohlenstoffbindung, Bodenverbesserung und nachhaltige Landwirtschaft und betreiben teilweise Pilotanlagen.

Abwasserwerke (ARA): Klärschlämme sind ein wichtiger Rohstoff für die HTC Technologie, gleichzeitig ist die Technologie für die Klärwerke eine Möglichkeit um ihre Abfallprodukte effizienter zu verwerten.

Schweizerische Klimastiftung: Die Schweizerische Klimastiftung unterstützt Projekte zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Förderung nachhaltiger Technologien. Sie hat Forschungsprojekte finanziert, die sich mit Biochar und ihrer Rolle bei der Kohlenstoffbindung und dem Klimaschutz befassen.

Organisationen und Verbände: Swiss Biochar Research Network (SBRN) und Charnet: Das SBRN ist ein Netzwerk von Forschenden, Praktikern und Stakeholdern, das sich der Förderung der Biocharforschung und -anwendung in der Schweiz verschrieben hat. Sie arbeiten an Projekten zusammen, tauschen Wissen aus und fördern nachhaltige Biochar-Praktiken. Charnet Switzerland sensibilisiert, bietet Aus- und Weiterbildung an und fördert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Interessengruppen, darunter Bauern, Forschenden und politischen Entscheidungsträgern. Für die Schweiz sind in diesem Zusammenhang auch die europäischen Organisationen, z.B. European Biochar Industry Consortium, Ithaka Institut, deren Zertifikate (European Biochar Certificate (EBC)) und die Gesetzgebung der Europäischen Union sehr wichtig, da sich die Schweizer Regulatoren meist daran orientieren.

Bauernverband und LandwirtInnen: Die Umsetzung von Bodenmanagementmassnahmen und Hauptnutzung von Biochar erfolgt durch Landwirt:innen, zusätzlich stellen sie mit Gülle einen möglichen Rohstoff für die HTC bereit. In anderen Bereichen, wie zum Beispiel im städtischen Gartenbau, sind Stadtgärtnerinnen und Stadtgärtner zuständig.

Bauindustrie und Startups, die die Nutzung von Biochar in der Baubranche, z.B. im Zement oder als Dämmstoff vorantreiben. [KLARK](#) der Firma LOGBAU ist z.B. der erste Beton in der Schweiz, der Biochar Anteile enthält und damit CO₂ einlagert. [Kohlenkraft](#) hat Pilotprojekte im Bereich Dämmstoff und Putz.

Die industrielle Produktion von Biochar wird auch stark von den **Schweizer Energieversorgern** vorangetrieben, teilweise neben, Wasser- und Solarkraftwerken auch Biomassekraftwerke betreiben und daher Erfahrung in diesem Bereich haben, z.B. Energie 360° oder [die IWB in Basel](#).

Organisationen und Firmen, die Marktplätze betreiben oder NET-Projekte entwickeln und finanzieren sind wichtig, um Projekte konkret umzusetzen und den Geldfluss sicher zu stellen, z.B. myClimate und Southpole. Dazu ist auch eine enge Zusammenarbeit mit der Finanzindustrie nötig. Diese Verbindungen sind im Bereich Biochar noch nicht so ausgeprägt, da in der Schweiz bisher meist kleine lokale Projekte umgesetzt werden.

2.2.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize

In der Schweiz

Die Schweizer Regierung erlaubt die Verwendung von Biochar zur Kompensation von Emissionen im Verkehrssektor. Dabei ist die Anwendung in der Landwirtschaft und im Bausektor angedacht. Im Bausektor kann Biochar sowohl in Baumaterialien, sowie als Füllmaterial im Boden verwendet werden.

Für die Landwirtschaft hat die Schweizer Regierung insbesondere in Abschnitt 5 und Anhang 3 der CO₂-Verordnung (Bundesrat 2012) den Einsatz dieser Technologie für Kompensationsprojekte geregelt, wobei nur eine Ausbringung von bis zu 8 Tonnen Biochar pro Hektar Boden erlaubt ist, wenn das Projekt zur Generierung von Zertifikaten berechtigt sein soll (Anhang 3). Darüber hinaus müssen solche Projekte die Schweizer Düngemittelverordnung einhalten, die Flächen müssen formell im Grundbuch eingetragen sein (Artikel 8a) und es muss nachgewiesen werden, dass das gebundene CO₂ mindestens 30 Jahre im Boden verbleibt (Artikel 5.2). Diese Anforderungen und auch das veröffentlichte Merkblatt (Bundesamt für Umwelt (BAFU) et al. 2023) zeigen, dass der Bund Biochar-Projekte grundsätzlich unterstützt, jedoch eine vorsichtige Haltung gegenüber der Anwendung von Biochar, insbesondere in Böden, einnimmt.

Die derzeit geltenden Anforderungen machen Biocharprojekte im Rahmen des Schweizer Entschädigungssystems unattraktiv. Insbesondere die nötige formelle Eintragung der Flächen ins Grundbuch kann hohe Transaktionskosten verursachen, aber auch ohne diese Regel, ist die Einbringung von Biochar in Böden für Landwirte derzeit nicht wirtschaftlich, selbst mit Berücksichtigung von Zertifikaten, da Biochar derzeit zu teuer ist. Erst wenn alle Vorteile der Biochar (d.h. geringere Stickstoffverluste, verbesserte Tierhaltung und Bodenfruchtbarkeit) und ihres Produktionsprozesses (z. B. Wärme und Strom aus dem Pyrolyseprozess) berücksichtigt werden, könnte die Anwendung durch Landwirte im Boden attraktiv werden.

Biochar-Projekte sind daher derzeit eher für den freiwilligen Markt attraktiv - was es dem Schweizer Staat nicht erlaubt, diese CO₂ Entfernung in seinem Inventar zu berücksichtigen.

Schließlich scheint es mehrere Kompromisse im Hinblick auf die nachhaltige Beschaffung von Biomasse für die Biocharproduktion und die Anrechnung der oben erwähnten Zusatznutzen zu geben. Höherwertiges Holz muss in einer Kaskade zunächst als Baumaterial verwendet und erst später pyrolysiert werden. Die Anreize müssen durch die Regulierung so gesetzt werden, dass diese Kaskadennutzung erfolgt und alle Zusatznutzen berücksichtigt werden, so dass die Biomasse dort landet, wo sie den höchsten gesellschaftlichen Nutzen für die Schweiz bringt und nicht dort, wo die Zahlungsbereitschaft am höchsten ist oder Subventionen zu Verzerrungen führen (z.B. durch die Förderung erneuerbarer Energien für Holzverbrennungsanlagen).

International

Ein aktueller Literaturüberblick zur politischen Unterstützung der Anwendung von Biochar (Pourhashem et al. 2019) kommt zu dem Schluss, dass es zumindest in den USA derzeit keine direkten politischen Anreize gibt, um eine Monetarisierung der positiven Effekte zu ermöglichen (z.B. die Wasserqualität, die Kohlenstoffbindung im Boden). Die Literatur zeigt jedoch, dass die Nutzung von Biochar in Kategorien fallen kann (wie biobasierte Produkte oder landwirtschaftliche Mehrwertprodukte), die im Rahmen bestehender Regelungen für eine politische Unterstützung in Frage kommen. Unter Berücksichtigung dieser Definitionen fanden die Autoren 35 politische Maßnahmen, die Biochar in den USA direkt oder indirekt unterstützen, einschließlich finanzieller Anreize, nicht-finanzieller politischer Unterstützung und Finanzierung von Forschung und Entwicklung. Darunter befand sich beispielsweise eine Kreditgarantieregelung für Bioraffinerien und Hersteller biobasierter Produkte, die Garantien für bis zu 80 % der gesamten förderfähigen Projektkosten bietet und bereits auf eine Anlage zur Herstellung von Biokraftstoffen und Biochar im industriellen Maßstab angewendet wurde. Zu den nicht-finanziellen Unterstützungsmaßnahmen gehören politische Maßnahmen, die Biochar ausdrücklich als technologische Option zur Bewältigung spezifischer Umweltbedürfnisse wie der Erhaltung der Wälder oder der Eindämmung des Klimawandels betrachten. Trotz dieser bestehenden Regelungen weisen die Autoren darauf hin, dass Biochar bisher weniger erfolgreich bezüglich politischer Unterstützung war, als andere NET-Massnahmen.

Pourhashem et al. (2019) nennen auch das Fehlen von Produktzertifizierungen oder -normen als eine große Herausforderung für diese Technologie, da dadurch die Umweltvorteile und Eigenschaften weniger gut definiert sind. Es gibt zwar Fortschritte in diesem Bereich, angeführt von der Internationalen Biochar Initiative, die eine internationale Qualitätsnorm für Biochar aufgestellt hat. In den USA ist die Zertifizierung jedoch bisher freiwillig und nicht einheitlich.

Auf dem freiwilligen Markt wird Biochar jedoch weltweit im Rahmen von Emissionskompensationen gehandelt (siehe Abschnitt 2.2.8). Darüber hinaus werden derzeit vom Artikels 6.4 Supervisory Body (UNFCCC 2023) des Pariser Übereinkommens Empfehlungen zur Einbeziehung von Removals - auch von Biochar - in den Mechanismus dieses Artikels ausgearbeitet. Eine Entscheidung zu diesem Thema wird auf der COP28 in Dubai im Dezember 2023 erwartet. Diese Empfehlungen und die daraus resultierende Arbeit zu Anrechnungsmethoden für Removals sind ein wichtiger Präzedenzfall für andere Zertifizierungsstellen.

2.2.8 Bilanzierung

Biochar im nationalen Treibhausgasinventar

Die Nutzung von Biochar in der Land- und Forstwirtschaft ist in der Treibhausgasinventarkategorie des Sektors Land-, Forst- und Landnutzung (AFOLU) zu berücksichtigen, da damit der Kohlenstoffgehalt des Bodens erhöht wird. Die gesamte Wertschöpfungskette - vom Wachstum und Ernte von Biomasse, Beschaffung von Abfall-Biomasse bis zur Verarbeitung zu Biochar - ist jedoch viel komplexer. Die Verfeinerungen des IPCC-THG-Inventars 2019 enthalten Spezifikationen für die Bilanzierung von Biochar im AFOLU-Sektor in Form einer *Methode zur Schätzung der Veränderung der mineralischen organischen Kohlenstoffvorräte im Boden durch Biocharanreicherung* (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019, Band 4, Anhang 4). Dies ermöglicht eine detailliertere Berechnung, um die Akkumulation von Kohlenstoff in Böden durch die Anwendung von Biochar zu verfolgen, ist aber nur für mineralische Böden in Grünland und Ackerland anwendbar. Sie definiert Biochar als festes Material, das durch Erhitzen von Biomasse auf eine Temperatur von über 350 °C unter kontrollierten und begrenzten Oxidationsmittelkonzentrationen erzeugt wird, um eine Verbrennung durch Pyrolyse oder Vergasung zu verhindern. Die daraus resultierende Zunahme des Bodenkohlenstoffs durch Biochar wird getrennt von anderen organischen Ergänzungen über einen Zeitraum von 100 Jahren geschätzt, da Biochar beständiger ist (daher kann die Methode der Bestandsänderung nicht verwendet werden): Die Methode verwendet die Gesamtzahl der auf Acker- und Grünlandflächen erzeugten und dem Mineralboden hinzugefügten Biochar (nicht die Ausbringungsmengen) und lässt Wechselwirkungen zwischen Biochar und Bodentypen oder Bodenbewirtschaftung außer Acht. Die Methode erfordert

jedoch die Verfolgung der Quelle des Biomasse-Rohstoffs und der Temperatur der Pyrolyse, um den Kohlenstoffgehalt der Biochar zu ermitteln.

Tabelle 2: Übersicht über die für Biochar geltenden Normen zur Kohlenstoffentfernung (Eigene Darstellung auf Basis der Diskussion im DeCIRRA online-Workshop am 20.03.23)

Standards / Kriterien	Puro.earth	Verra Carbon Standard (freiwillig, USA)	European Biochar Certificate (freiwillig, Europa)	Schweizer CO₂ Verordnung	European Union Certification Framework for Carbon Removals
Erlaubte Nutzung				Düngung / Bodenausbringen (bis 8 t/Hektar pro Kreditierungsperiode Evtl. nach Vernehmlassung auch Baumaterial	
Erlaubte Ausgangsmaterialien	Nachhaltige Biomasse, Abfallbiomasse und explizit für Biochar angebaute Biomasse	Spezifiziert in der Methode VM0044	Siehe EBC Positivliste	Noch nicht klar. Für Biochar gibt es in CH aber Kriterien für die Produktion	Noch nicht definiert
Additionalität (wäre Projekt ohne Anreiz durchgeführt worden)	Individuell nachzuweisen, z.B. Investitionsanalyse	Solange weniger als 5% der Abfallbiomasse weltweit in die Pyrolyse gehen ist es zusätzlich (nicht für Energiegewinnung)	Kein Nachweis verlangt	Voraussichtlich Investitionsanalyse	Noch nicht definiert aber Aussage Kohlenstoffabbauaktivitäten gehen über die Standardpraktiken und die gesetzlichen Anforderungen hinaus
Permanenz (Dauerhaftigkeit und Risiko Leckage)	100 Jahre	100 Jahre	100 Jahre	100 Jahre	Wenn Biochar als technische Lösung akzeptiert werden soll > 1000 Jahre
Quantifizierung (Monitoring, Reporting and Verification)	Entsprechend der Puro Methode	Entsprechend der Methode VM0044	Entsprechend EBC C-Senkenmethode	Nach eigens zu beschreibender Methode im BAFU Projektantrag	Noch nicht definiert
Transparenz (Governance, Register)	Puro Register	Verra Register	Register von Carbon Standards International	BAFU Register	Noch nicht definiert
Ausschluss Doppelnutzung / Doppelzählung (Corresponding Adjustments)	Freiwilliger Markt: Solange Biochar nicht in den nationalen Emissionsinventaren berücksichtigt wird gibt es keine Doppelzählung	Freiwilliger Markt: Solange Biochar nicht in den nationalen Emissionsinventaren berücksichtigt wird gibt es keine Doppelzählung	Freiwilliger Markt: Solange Biochar nicht in den nationalen Emissionsinventaren berücksichtigt wird gibt es keine Doppelzählung	Wird im Inventar berücksichtigt werden, sobald Projekte möglich sind	Noch nicht definiert
Anrechenbarkeit, z.B. im nationalen Inventar	Nicht vorgesehen von Seiten des Standards	Nicht vorgesehen von Seiten des Standards	Nicht vorgesehen von Seiten des Standards	Ja, Voraussetzung ist Grundbucheintrag	Noch nicht definiert
Baseline	Kein Projekt (Business as Usual – BAU)	Kein Projekt (BAU)	Kein Projekt (BAU)	Noch nicht klar; abhängig vom Programm; wahrscheinlich kein Projekt (BAU)	Noch nicht definiert

Projektbezogene MRV von Biochar-Projekten

Biochar hat den größten Marktanteil aller Projekt für Negative Emissionen auf den freiwilligen Kohlenstoffmärkten und erzielt Durchschnittspreise von 186 \$/tCO₂ (cdr.fyi, 2023). Es gibt eine Reihe von Programmen und Standards, die CDR-Produkte [auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt](#) anbieten¹³. Eines der ersten Programme wurde von First Climate auf der Grundlage der Norm ISO 14-064-2 angeboten, das 2019 die ersten 124 t CO₂, die durch Biochar entfernt wurden, verkauft hat. Der freiwillige Kohlenstoffstandard Verra hat im August 2022 eine Methodik für die Nutzung von Biochar im Boden und für eine Anwendung außerhalb des Bodens veröffentlicht. Gleichzeitig gibt es neue Institutionen, die Kohlenstoffstandards entwickeln, die sich nur auf CDR konzentrieren, darunter Puro mit seiner ersten Biochar-Methode im Mai 2019 oder CarbonFuture mit seinem C-Sink-Zertifizierungsstandard im Zusammenhang mit der [Europäischen Biochar-Zertifizierung \(EBC\)](#)¹⁴. Diese verschiedenen Standards haben sehr ähnliche Anforderungen an die Biocharqualität (d. h. sie folgen der EBC-Qualitätskontrolle), unterscheiden sich aber in der Bestimmung der Baseline, der Projektemissionen (z. B. wie sie Emissionen für die Beschaffung von Biomasse einbeziehen), der Leckage und der Systemgrenzen, der Zusätzlichkeit und der Quantifizierung des langfristigen stabilen Entfernungseffekts von Kohlendioxid (Permanenz).

Wie in Tabelle 2 gezeigt, entstehen mehr und mehr auch Standards für Biochar, die durch die Arbeiten von Branchenakteuren wie der Europäischen Biochar-Initiative (EBI) und der späteren Einführung der Puro Earth-Norm entstanden sind, wobei beide anfangs wegen mangelnder Transparenz und fragwürdiger Bestimmung der Zusätzlichkeit kritisiert worden waren (Poralla et al. 2022). So hat beispielsweise der Verified Carbon Standard (VCS) im Jahr 2022 eine Baseline- und MRV-Methode für Biochar eingeführt, die es ermöglicht, auf dem weltweit größten freiwilligen Kohlenstoffmarkt die Nutzung von Biochar mit der erforderlichen Transparenz und Rechenschaftspflicht zu monetarisieren.

2.2.9 Offene Fragen

Die Beschäftigung mit den technologischen Aspekten der Verwendung von Biochar entweder als Zusatzstoff bei der Betonherstellung oder zur Verbesserung des Kohlenstoffgehalts im Boden wirft einige weitere Fragen auf. Erstens muss geklärt werden, welche Ausgangsmaterialien für Biochar für solche Anwendungen geeignet sind. Die Auswirkungen der Verwendung verschiedener Materialien, wie z. B. Holzabfälle, könnten in Bezug auf die Qualität variieren, so dass einige Ausgangsmaterialien entweder als nicht nachhaltig oder anderweitig problematisch eingestuft werden müssen. Darüber hinaus besteht die Herausforderung, den tatsächlichen Nutzen der Kohlenstoff-Entfernung auf Projektebene zuverlässig zu messen, da die Standards hinsichtlich des Detaillierungsgrads bei der Bestimmung des in der Biochar enthaltenen Kohlenstoffs sowie der Berücksichtigung potenzieller vorgelagerter Verdrängungseffekte (die möglicherweise zu Emissionen zweiter Ordnung durch Landnutzungsänderungen führen) variieren. Weitere Themen sind die Notwendigkeit einer systematischeren Kategorisierung der Qualität von Altholz für die Verwendung als Ausgangsmaterial, die Erkundung zusätzlicher Anwendungspfade für verschiedene Bodentypen, einschließlich möglicherweise städtischer Infrastrukturen, und die Bestimmung der Zuverlässigkeit der Kohlenstoffspeicherdauer für verschiedene Biocharqualitäten. Die damit verbundenen technologischen Nuancen erfordern eine wissenschaftliche Untersuchung, um diese Lücken zu schließen.

Was die Frage nach Risiken, Nutzen, Kosten und potenziellen Treiber angeht, so kann die Auswirkung von Biochar auf die Wasserrückhaltung im Boden ein zusätzlicher Nutzen sein. Jedoch besteht hier eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit und die Auswirkung auf die landwirtschaftliche Produktivität. Das Verständnis dieser Wirkung für verschiedene Bodentypen könnte entscheidend sein, um die Verbreitung von Biochar zu beschleunigen, da die Vorteile über die Kohlenstoffbindung hinausgehen und auch andere Ökosystemleistungen umfassen. Die Quantifizierung

¹³ Übersicht der CO₂ Einkäufe weltweit, <https://www.cdr.fyi/>, Abgerufen am 17.7.2023

¹⁴ <https://www.european-biochar.org/en/>

dieser zusätzlichen Vorteile in monetärer Hinsicht ist jedoch ein komplexes Unterfangen. Die Herausforderung besteht darin, den Zusatznutzen wie Bodenfruchtbarkeit, Wasserqualität und Klimaschutz einen monetären Wert beizumessen, um eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse zu erstellen.

Schließlich müssen auch Fragen der Governance, wie Normung, unabhängige Kontrolle und Überwachung der Biocharproduktion und -qualität, berücksichtigt werden. Bestehende Nachhaltigkeitszertifizierungen und freiwillige Kohlenstoffmarkt-gutschriften decken möglicherweise nicht alle Aspekte umfassend ab, und der im Entstehen begriffene EU-Zertifizierungsrahmen stellt ein zusätzliches Fragezeichen dar, da er ohne Einzelheiten verspricht, auch die biologische Vielfalt und andere Ökosystemeffekte in seiner Methodik zu berücksichtigen. Grenzüberschreitende Aktivitäten erhöhen die Komplexität zusätzlich, da die Zugabe von Biochar in den Boden auf nationaler Ebene in der Regel nicht einheitlich erfasst wird, was die genaue Berichterstattung über die Kohlenstoffflüsse bei grenzüberschreitenden Biomasse- oder Biochartransfers im Rahmen des Pariser Abkommens und die daraus resultierende genaue Anrechnung der CO₂-Entfernung erschwert. Darüber hinaus ist die Anrechnung von Nicht-Holz-Produkten, wie z. B. landwirtschaftliche Abfälle, die für Biochar verwendet werden könnten, ein Bereich, der noch nicht vollständig erforscht und standardisiert wurde. Diese mit der Governance zusammenhängenden Fragen erfordern daher eine gemeinsame Anstrengung aller Akteure der verschiedenen lokalen, nationalen und internationalen Ebenen, um sicherzustellen, dass sich die Biocharindustrie auf nachhaltige und global vorteilhafte Weise entwickelt.

2.3 TCCS

2.3.1 Allgemeine Beschreibung

Der Bausektor ist für 25% der Schweizer CO₂-Emissionen verantwortlich und dadurch einer der material- und emissionsintensivsten Sektoren in der Schweiz und weltweit.¹⁵ Davon ist die Herstellung von Baumaterialien für rund 30% der Treibhausgasemissionen verantwortlich (11 Mt CO₂) (Gauch et al. 2016). Der Holzeinsatz im Bau gilt mit Holz als nachwachsendem Rohstoff als eine Möglichkeit, den Bausektor zu decarbonisieren und ihn als langfristigen CO₂-Speicher zu nutzen.

Durch Photosynthese wird atmosphärisches CO₂ in Kohlenstoff gebunden und der Kohlenstoff im Holz gespeichert. Durchschnittlich wird eine Tonne CO₂-Äquivalent in einem Kubikmeter Holz gespeichert (vgl. Abbildung 6).

1 Tonne CO₂ in 1 Kubikmeter Holz - wie geht das?

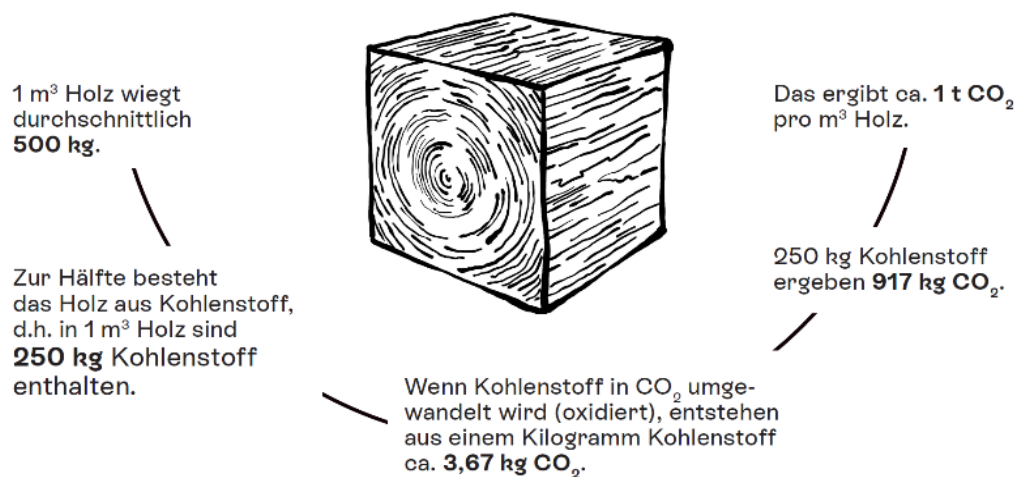


Abbildung 6: Umrechnung der in einem Kubikmeter Holz gespeicherten Menge Kohlenstoffdioxid in Kohlenstoff (CLB Schweiz GmbH)

Wird dieses Holz verbaut, so können die im Wald sequestrierten CO₂-Äquivalente abhängig von der geplanten Lebensdauer des Gebäudes und der Handhabung des Materials beim allfälligen Rückbau des Gebäudes über Jahrzehnte bis hunderte von Jahren im Gebäude und Baumaterial gespeichert bleiben. Wird im Sinne der Kreislauf- oder Kaskadennutzung geplant, so kann das Holztragwerk im Falle eines Abbruchs wiederverwendet oder in einer Kaskade recycelt werden. Zum Zeitpunkt, an dem das Bauholz verbrannt wird, werden aktuell durch die entstehende Wärme fossile Brennstoffe substituiert. Etabliert sich BECCS als Standardlösung, werden zum Zeitpunkt des Verbrennens negative Emissionen generiert. Gleichzeitig werden auch emissionsintensive alternative Baumaterialien wie Stahl und Beton substituiert, wodurch die Emissionen der Bauindustrie reduziert werden.

Im Holzbau kommen vor allem Nadelhölzer und dank neuen Technologien vermehrt auch Laubhölzer wie Buche zum Einsatz. Die CO₂ Speicherkapazität im Laubholz beträgt rund 1.2 Tonnen pro Kubikmeter im Vergleich zu Nadelhölzern mit ca. 1 t CO₂ Speicherkapazität, weshalb Laubholz auch unter diesem Gesichtspunkt zukünftig mehr Aufmerksamkeit zu schenken ist. Die Prozessenergie in Form von Wärme (z.B. Trocknungskammern), welche zur Verarbeitung von Rundholz zu Konstruktionsholz benötigt wird, stammt grösstenteils aus der energetischen Verwertung von Nebenprodukten aus den Holzverarbeitenden Betrieben, weswegen sie als CO₂-neutral betrachtet

wird.¹⁶ Strom für die mechanischen Prozesse kann mit dem Schweizer Verbraucherstrommix angerechnet werden, wobei die grossen Dächer der Werke vermehrt mit Solarzellen bestückt werden, so dass auch der Strom kaum CO₂-Emissionen ausweist. Die Transportemissionen sind abhängig von den gewählten Transportwegen und -vehikeln (LKW, Güterzüge).

Seit der Revision der Brandschutzverordnung 2015 ist der Holzbau in der Schweiz für jede Gebäudekategorie, also auch für Mehrfamilienhäuser (MFH) und Hochhäuser möglich (Bader 2022). Im Gegensatz zu alternativen Bauweisen ist der Holzbau weniger ressourcen- und emissionsintensiv, aber ebenso dauerhaft. In Holzgebäuden kann der aus der Atmosphäre im Wald sequestrierte Kohlenstoff bis zu 200 Jahre lang gespeichert werden (Bader 2022).

Als sogenannte Negativemissionstechnologie «Timber Carbon Capture and Storage» (TCCS) oder auch «Timber in Construction» (UNFCCC 2022) bezeichnet man die Verwendung von Holz (Mass Timber) in den tragenden und daher bis zum planerischen Lebensende des Gebäudes über rund 100 Jahre verbauten Bauelementen vornehmlich in mehrgeschossigen Gebäuden. Die langlebige Verwendung von Holzbaustoffen ermöglicht eine langfristige CO₂-Speicherung im Schweizer Gebäudepark. Da in der Schweiz etwa viermal mehr Baustoffe verbaut als rückgebaut werden und solange mehr Holz verbaut als entsorgt wird, entsteht eine netto CO₂-Speicherung (Savi and Klingler 2022). Als einziger CCS (Carbon Capture & Storage) oder Carbon Removal Ansatz erzielt TCCS zusätzlich zur Speicherleistung als Ersatzmaterial für Stahl und Beton – das aufgrund des erheblichen Gewichts meist aus nationaler Produktion¹⁷ stammt - auch eine beachtliche Substitutionsleistung als Ersatz insbesondere im Bereich von statischen Hochleistungsbaulementen wie Träger und Stützen aus Laubholz, wobei die Substitutionswirkung - abhängig von der eingesetzten Technologie bei der Produktion der Substitute in der Baseline - variieren kann. Die Kombination von Sequestrierung, Speicherung und Substitution wird daher international auch als 3S-Ansatz bezeichnet.

In der Schweiz wurden im Jahr 2020 rund 800'000 m³ Holz verbaut (in Wänden, Decken, Fassaden, Dachstühlen, exkl. Dämmstoffe, Treppen, Bauhilfsstoffe und Möbel) (Winterberg et al. 2022). In der Schweiz eingesetztes Konstruktionsholz stammt nicht aus Primärwäldern.

Im Jahr 2021 wurden in Schweizer Werken 208'000 m³ Schnittholz zu Leimholz für den Bau verarbeitet, was einer Steigerung um 15 % zum Vorjahr (2020, 180'869.6 m³) entspricht (Lädrach 2022). Es wird davon ausgegangen, dass im Bauwesen etwa 75 % des Bauholzes importiert werden (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022), wobei der Nachweis des Ursprungslandes komplex ist und daher trotz Vorgaben in der Holzhandelsverordnung meist nicht bekannt ist. Ein grosser Anteil des Bauholzes in der Schweiz stammt aus Deutschland und Osteuropa.

2.3.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber

Die Verwendung von Holz als Baumaterial für tragende Konstruktionen ermöglicht die Speicherung von Kohlendioxid während rund 100 Jahren und damit die Entfernung aus der Atmosphäre. Je nach Ende der Lebensdauer von Holzbaustoffen kann CO₂ nach der Lebensdauer eines Gebäudes in die Atmosphäre emittiert werden, z.B. wenn das Holz in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt wird. Wenn diese in Zukunft mit CCS ausgerüstet wird, dann bleibt der größte Teil dieses CO₂ geologisch gespeichert und damit dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt. Im Hinblick auf die Klimaauswirkungen ist der Zeitraum der Speicherung von CO₂ in Holzbaustoffen von wesentlicher Bedeutung, da wir in den nächsten Jahren eine deutliche Reduktion erreichen müssen und mit dieser «Zwischenspeicherung» Zeit gewinnen und einen Temperatureffekt erreichen (Siehe Abbildung 7) (Ciais et al. 2014, S. 548). Um die Klimaauswirkungen von Holz als Baumaterial richtig zu bewerten, muss die Verwendung von

¹⁶ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wald-und-holz/wald-und-holz--fachinformationen/waldzustand-und-waldfunktionen/holzproduktion/holzenergie.html>

¹⁷ In der Schweiz stammt der eingesetzte Kies und Zement zu über 90% aus der Schweiz. Bewehrungsstahl ist grösstenteils Recyclingstahl aus Gerlafingen SO, der mit einem Elektrolichtbogen relativ CO₂-freundlich hergestellt wird.

Holzprodukten aus der Ernte in die Analyse der Kohlenstoffbilanz des Waldes integriert werden (Geng et al. 2017)

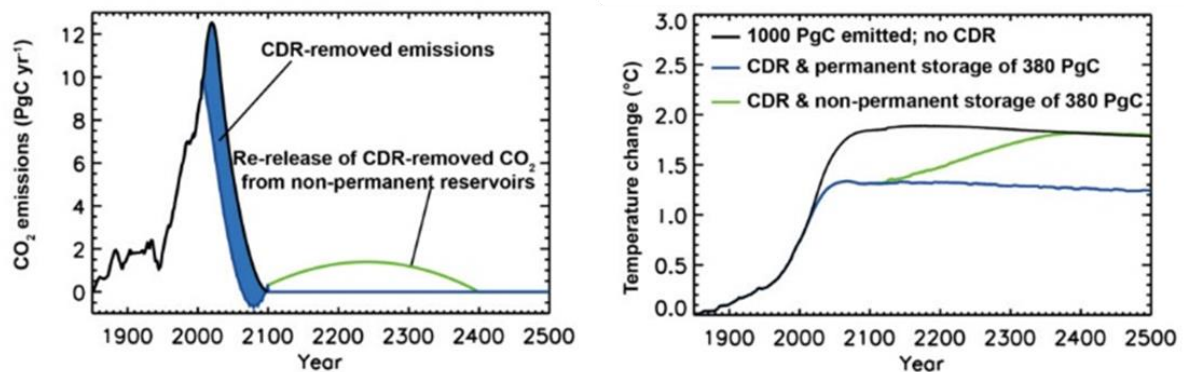


Abbildung 7: Visualisierung der (temporären) CO₂ Speicherung und des damit verbundenen Temperatureffekts auf globaler Ebene für eine bestimmte Menge an (temporär) gespeichertem CO₂ (Ciais et al. 2014, p. 548).

Die wichtigsten Elemente und Systemgrenzen für die Bilanzierung von Klimaauswirkungen und anderen Umweltbelastungen der Holzbaustoffe sind die Bereitstellung von Biomasse, die Herstellung der Produkte, ihre Verwendung in Gebäuden und die Verarbeitung am Lebensende. Der Kohlenstoff-Fluss von Wald- und Produktsystems ist in Abbildung 8 zu finden.

Für die Klimaauswirkungen des Forstsektors ist sowohl der gesamte biogene Kohlenstoffbestand als auch die Gesamtmenge des in die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffs relevant. Hierfür kann das System in die Teilsysteme "Wald" und "Holzprodukte" unterteilt werden (siehe Abbildung 8). Der gesamte biogene Bestand ist die Summe der C-Bestände in den Teilsystemen. Die gelben Kästchen zeigen Prozesse innerhalb der Wirtschaft an, die Veränderungen unterliegen. Dazu gehört eine veränderte die Kohlenstoffintensität der ersetzten Materialien, andere die Produktionstechnologien für verdrängte Materialien und die mögliche CCS-Anwendung in diesen Prozessen sowie die mit der Holzverarbeitung verbundenen Emissionen.

Die Herkunft des Holzes ist wichtig, denn nicht nachhaltigen Forstwirtschaft kann die Umwelt erheblich belasten. Potenzielle Veränderungen der Biomassevorräte in Wäldern und Waldböden als Folge der Holzernte müssen berücksichtigt werden. Wenn Bäume aus speziellen Plantagen geerntet werden, müssen direkte und indirekte Landnutzungsänderungen und damit verbundene Klimaauswirkungen und andere Umweltbelastungen berücksichtigt werden. Wenn Holz aus nachhaltiger Herkunft in einem bestimmten geografischen Gebiet als begrenzte Ressource betrachtet werden muss, sind die Folgen seiner Verwendung als Baumaterial anstelle anderer Zwecke, z.B. der Energieerzeugung, zu berücksichtigen.

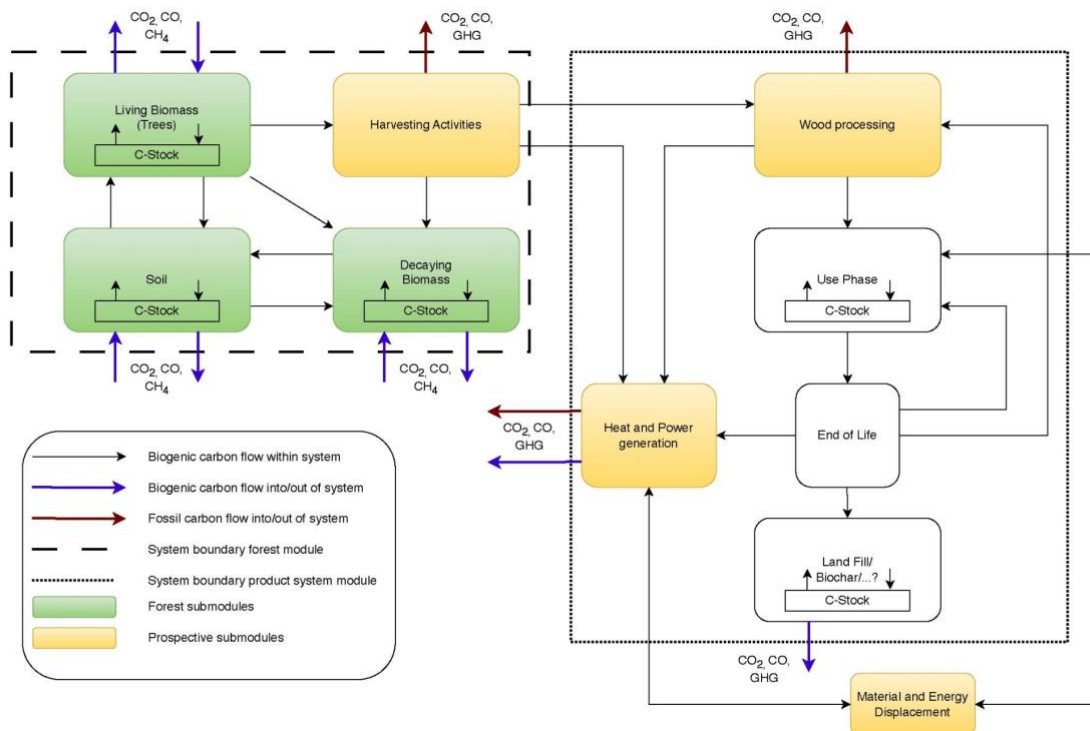


Abbildung 8: Exemplarisches Prozesssystem einer typischen TCCS-Prozesskette, das die wichtigsten Aspekte der (Kohlenstoff-)Bilanzierung veranschaulicht

Da das Ende der Lebensdauer von Gebäuden, die heute oder in Zukunft gebaut werden, nicht bekannt ist, wird empfohlen, mehrere verschiedene Szenarien in die Bilanzierung einzubeziehen und die Auswirkungen dieser Szenarien zu quantifizieren. Das Gleiche gilt für die Lebensdauer von Gebäuden. Bei den Szenarien für das Ende der Lebensdauer müssen potenzielle "Nebenprodukte" der Entsorgung berücksichtigt werden, z. B. die Energieerzeugung, wenn Holz verbrannt wird (Cordier et al. 2022).

Wenn Holzbaustoffe traditionellere Materialien wie Beton, Ziegel und Stahl ersetzen, müssen die Auswirkungen einer solchen Substitution in Form von geringeren oder höheren Umweltbelastungen quantifiziert werden. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass substituierte Produkte (in Bezug auf ihre Herstellung) vermieden werden, und es können Umweltgutschriften in Höhe der mit ihrer Herstellung verbundenen Belastungen angerechnet werden. Die Quantifizierung solcher Substitutionseffekte muss auf der Grundlage der gleichwertigen Funktionalität von Baumaterialien im Kontext der bebauten Umwelt erfolgen und die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes (unter Berücksichtigung potenziell unterschiedlicher Lebensdauern von Komponenten) einschließlich etwaiger Instandhaltungs- oder erforderlicher Sanierungsarbeiten umfassen (Gustavsson und Sathre 2011). Potenzielle Auswirkungen auf den betrieblichen Energiebedarf für die Heizung und/oder Kühlung von Gebäuden sollten berücksichtigt werden, falls diese unterschiedlich ausfallen sollten. Auch hier ist es wichtig, zwischen den Mengen an CO₂, die der Atmosphäre entzogen werden, und den potenziellen CO₂ Emissionsminderungen aufgrund von Substitutionseffekten zu unterscheiden und diese getrennt auszuweisen.

Lebenszyklus eines Holzgebäudes

Abbildung 9 stellt den Lebenszyklus eines Holzgebäudes und die für die Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse relevanten Lebenszyklus-Stationen dar.

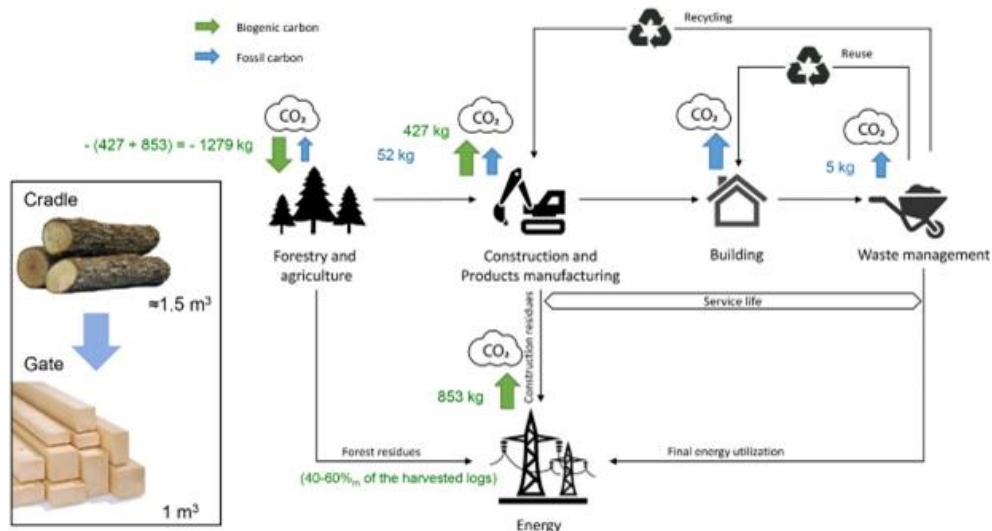


Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung des Lebenszyklus eines Holzbaus und der je Lebensabschnitt anfallenden Kohlenstoffströme (Pittau et al. 2022, p. 15).

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der Treibhausgasemissionen der Produktion, des Transports und der Entsorgung von 1m³ Brettschichtholz, mit Herstellung in der Schweiz (Beispiel 1), in Deutschland (Beispiel 2) und in Ungarn (Beispiel 3) und Import in die Schweiz. Das in Ungarn produzierte Brettschichtholz verursacht 79% mehr Treibhausgasemissionen als das in der Schweiz produzierte. Es wird ersichtlich, dass der Strommix für die Trocknung, sowie der Transport die Gesamtemissionen stark beeinflussen. In Beispiel 1 verursacht der Transport 16% der Emissionen, in Beispiel 3 verursacht dieser 35% (Frischknecht and Ramseier 2020).

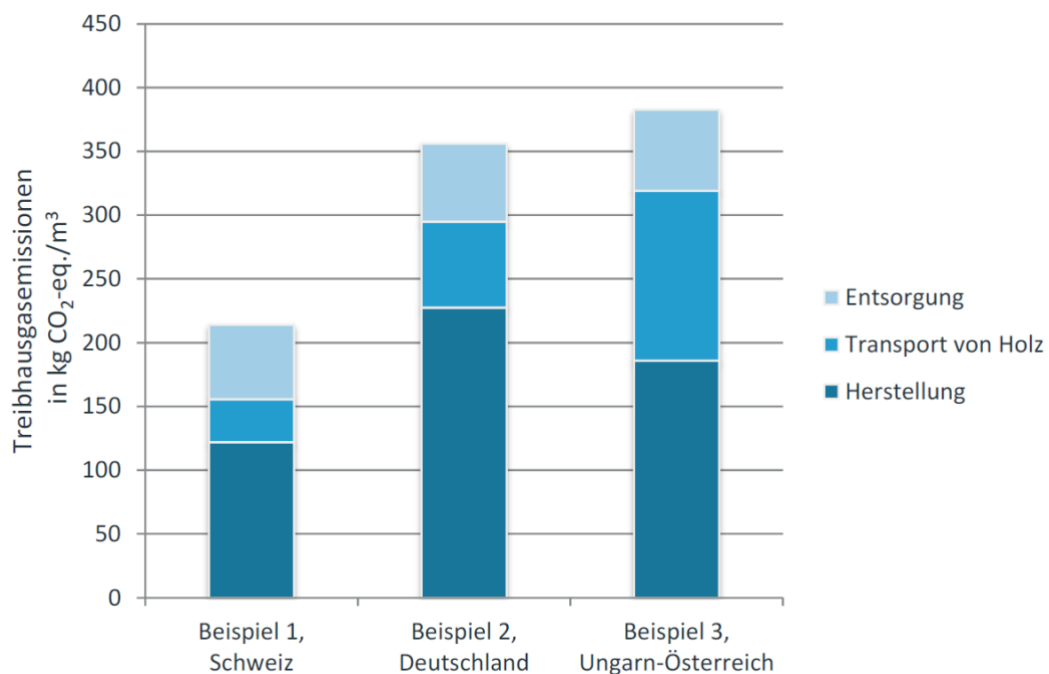


Abbildung 10: Unterschiede in den verursachten Treibhausgasemissionen für 1 m³ Brettschichtholz produziert in der Schweiz, in Deutschland und in Ungarn (Frischknecht and Ramseier 2020, p. 11).

Holzbeschaffung

Die Holzernte erfolgt meist durch Maschinen, welche mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Möglichkeiten zur Reduktion dieser Emissionen bestehen durch den Ersatz durch elektrobetriebene Maschinen.

Die Voraussetzung für die Holzbeschaffung im Sinne von TCCS ist, dass keine Übernutzung der Wälder stattfindet, da dies zu einer Reduktion in der CO₂-Sequestrierung im Wald sowie Biodiversitätsverlusten führt. Waldbewirtschaftungssysteme wie FSC und PEFC tragen dazu bei, dass Importholz aus sicheren und kontrollierten Quellen stammt. Im Gegensatz zu Einsatzgebieten von Tropenholz (Terrassenböden, Bodenbeläge), stammt Konstruktionsholz nie aus Primärwäldern, sodass kein Zusammenhang zwischen dem Schweizer Holzbau und Kohlenstoffflüssen in Primärwäldern besteht.

Herstellung

Die Herstellung von Holzwerkstoffen erfolgt mit einem Mix aus biogenen und fossilen Energieträgern. Die Trocknung von Holz erfolgt im Holzverarbeitenden Betrieb meist durch den Einsatz von Restholz (Pittau et al. 2022). Die Klebstoffe die bei der Produktion von Konstruktionsholz verwendet werden stammen normalerweise aus fossiler Produktion.

Transport

Der Transport von Rund- und Konstruktionsholz erfolgt in der Schweiz und Europa hauptsächlich über LKWs. Auch aus dem Ausland importiertes Holz wird hauptsächlich über LKWs eingeführt.

Der Einsatz von CO₂-neutralen Kraftstoffen im Fuhrpark kann einen positiven Einfluss auf die CO₂-Bilanz haben. Der Transport von Konstruktionsholz verursacht den grössten Anteil der Herstellungsemissionen, wenn Konstruktionsholz importiert wird (eigene Berechnung mit dem treeze Holzrechner¹⁸). Bei Schweizer Holz wird mit einer Durchschnittsdistanz von ca. 190 km Transportweg gerechnet, wodurch sich die Emissionen aus dem Transport mit den Emissionen aus der Herstellung angleichen.

Würden keine Importe stattfinden, müsste der gesamte Holzbedarf der Schweiz aus regionalem Holz gedeckt werden. Dies könnte zur Übernutzung der Wälder und zusätzlichen Emissionen und Kosten führen, da Holz aus schlecht erschlossenen Regionen z.B. per Helikopter genutzt werden müsste. Gleichzeitig müssten neue Technologien standardisiert werden, welche den konstruktiven Einsatz von Holz von niedrigeren Qualitäten erlauben (z.B. Scrimber).

Holzart

Die Holzart hat einen Einfluss auf den Kohlenstoffgehalt im Konstruktionsholz. Laubholz wird tendenziell länger getrocknet als Nadelholz. Da die Trocknung jedoch entweder natürlich erfolgt, oder durch Restholzenergie, kann sie als CO₂-neutral betrachtet werden.

End of Life

Bei der Verbrennung von Konstruktionsholz wird hauptsächlich biogener Kohlenstoff emittiert, welcher dem Kohlenstoffgehalt des Holzes entspricht. Wenn Konstruktionsholz wieder verwendet oder in die Kaskade geführt wird, dann können diese Emissionen zeitlich verschoben werden. Als negative Emissionen gelten sie aber langfristig nur, wenn beim End-of-Life entweder BECCS oder Pyrolyse eingesetzt wird.

2.3.3 Co-Benefits

Co-Benefits des Holzbaus können in weitere klimarelevante Co-Benefits wie die Substitution anderer emissionsintensiven Baumaterialien (falls diese nicht bereits angerechnet wurde), Erhöhung des Senkenleistung durch bessere nachhaltige Waldbewirtschaftung und eine Verbesserung der Resilienz

¹⁸ https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/calculators/631-Holzrechner_v1.0.xlsx

der Wälder gegen Extremwittersituationen. Nicht klimabezogene Co-Benefits bestehen in der Abfallvermeidung und anderen umweltbezogene Co-Benefits.

Direkt klimarelevante Co-Benefits

Substitution anderer Baustoffe

Neben der CO₂-Speicherung, welche der Holzbau aufweist, ist der wichtigste Co-Benefit die Emissions- bzw. CO₂-Vermeidung durch die Substitution anderer Baustoffe. Abbildung 11 zeigt 10 Fallbeispiele, in denen Holzbauten mit ihren mineralischen und funktional äquivalenten Zwillingen bezüglich grauer Treibhausgasemissionen verglichen werden. In allen Fällen haben die mineralischen Gebäude höhere graue Treibhausgasemissionen im Bau. Die Holzgebäude weisen 12%-41% tiefere graue Emissionen auf Gebäudeebene auf (vgl. Spalte "Gebäude" als Differenz der Werte des Holzbaus verglichen mit dem massiven Zwillings). Der biogene Kohlenstoff, der in dieser Spalte aufgeführt wird, entspricht dem während dem Baumwachstum der Atmosphäre entzogenen Kohlenstoff, der nun im Bauteil gespeichert ist, relativ zu den gesamten Treibhausgasemissionen. Er wird als Prozentteil der Gesamtemissionen negativ aufgeführt (Lamster 2023), darf aber zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht einer Bilanz der grauen Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden. Im Bericht wird dazu folgendes bemerkt: *«Der biogene Kohlenstoffgehalt kann (...) nicht in einer Bilanz grauer Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden. Treibhausgasemissionen und biogene Kohlenstoffe sind aus Klimasicht zwei unterschiedliche Effekte, die nicht in einer Zahl zusammengeführt werden können. Graue Treibhausgasemissionen werden als kumulierte Summe aller bei der Herstellung entstandenen Emissionen dargestellt. Die Emission ist bei Fertigstellen des <Gebäudes bereits emittiert. Der biogene Kohlenstoff wird während des Baumwachstum der Atmosphäre entzogen und wird erst bei der Zersetzung oder der energetischen Verwertung wieder ausgestossen. Er ist so lange im Holz gespeichert, bis das Holz zerfällt oder verbrannt wird. Biogener Kohlenstoff ist also gespeichert im stehenden Baum oder in Bauholz in Gebrauch. Bei kurzfristigen Überlegungen zu Kompensationsmassnahmen in den nächsten Jahren ist es aber denkbar, dass man den bilanzierten Treibhausgasemissionen den biogenen Kohlenstoffgehalt in Form emittierter CO₂-Emissionen zumindest vergleichend gegenüberstellt»* (Lamster 2023, p. 18).

In der Wissenschaft und Praxis gilt seit ca. 2006 der Kaskadennutzungsansatz, d.h. Holz sollte wenn möglich, immer zuerst stofflich und am Ende der Lebensdauer im Minimum energetisch verwertet werden, um damit wiederum fossile Brennstoffe zu ersetzen. Es können daher Bauabfälle im Holzbau verglichen mit der Massivbauweise vermieden werden, indem die Bauteile bei adäquater Planung und Verbindung wiederverwendet werden (Müller and Moser 2022). Der Substitutionseffekt bei wiederverwendeten Holzbauteilen lässt sich auf 0.51 t CO₂ pro verbauter Tonne Holz beziffern (Suter 2016), was sich mit einer durchschnittlichen Holzdichte von 0.5t/m³ auf 0.255 t CO₂/m³ Sekundärrohstoff umrechnen lässt.

Wird das Bauholz beim Rückbau nicht stofflich, sondern energetisch verwertet, so werden fossile Energieträger mit einem Substitutionsfaktor von durchschnittlich 0.6 t CO₂-Äqu./m³ Holz substituiert (Hofer et al. 2007), wobei dies vom jeweiligen Strommix abhängig ist und sich daher über die Zeit ändern kann.

Wenn es keine Holz- oder Abfallverbrennungsanlagen wie in Entwicklungsländern, südlichem Europa oder USA gibt, muss das Holz deponiert werden. Neben der erhöhten Landnutzung, die sie verursachen, emittieren Deponien auch Methan und Lachgas.¹⁹

Von einer weiteren Substitution im Bereich der Dämmstoffe kann ausgegangen werden, was die graue Energie eines Holzhauses im Vergleich zum Massivhaus reduziert, da in Holzbauten seltener erdölbasierte und eher Holz- oder Naturfaser basierte Wärmedämmstoffe eingesetzt werden (Müller et al. 2015).

¹⁹ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar/abfall.html>

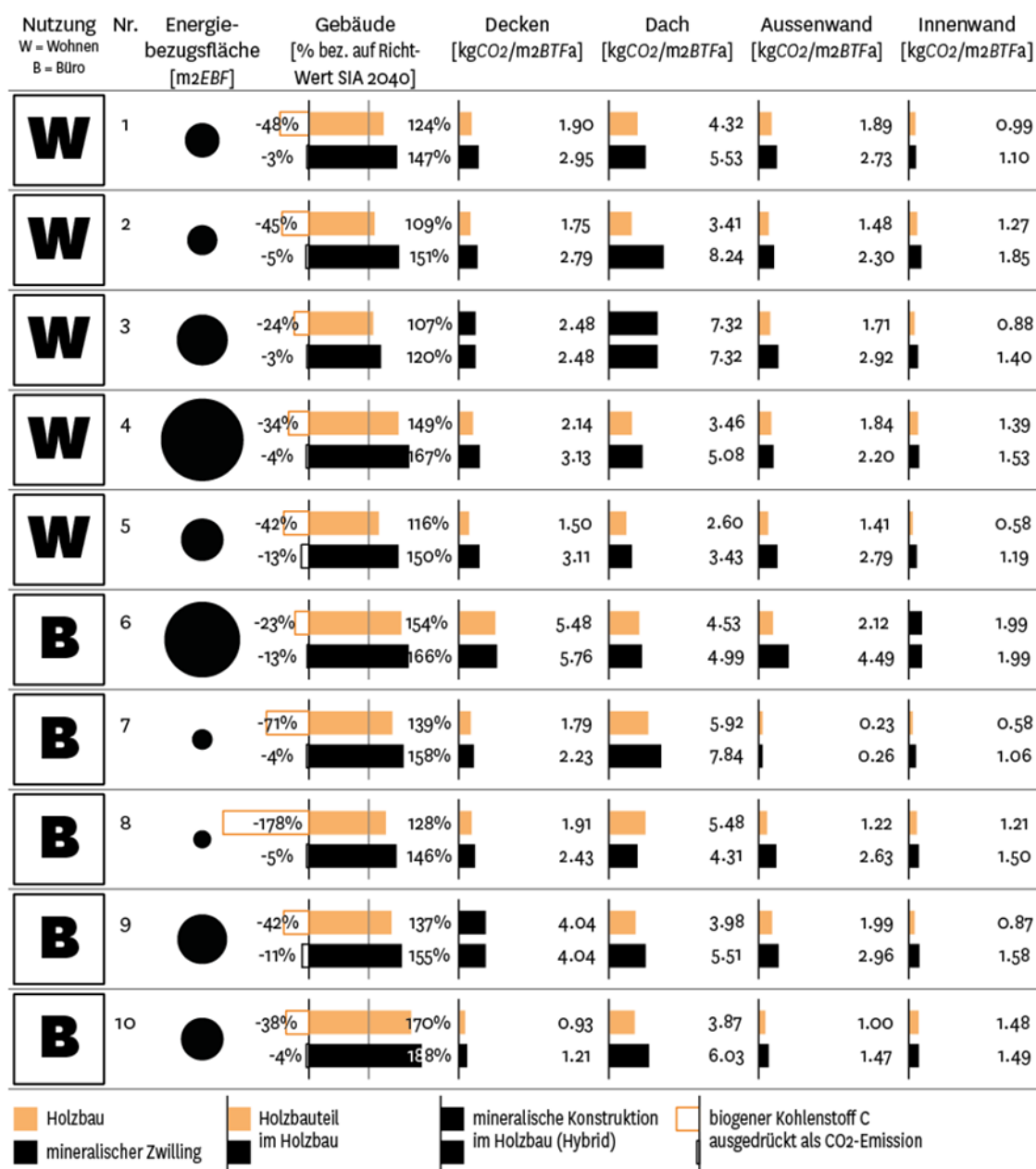


Abbildung 11: Treibhausgasemissionen von 10 Fallbeispielen (Lamster 2023, p. 10)

Anmerkung:

Die Kennwerte der **Gebäude** beziehen sich auf die Richtwerte der grauen Treibhausgasemissionen des SIA-Merkblattes 2040: 2017 Effizienzpfad Energie (bei Wohnen und Verwaltung = 9.0 kg/m²a).

Die Kennwerte der **Bauteile** beziehen sich auf den Quadratmeter Bauteilfläche.

Die Kennwerte der **biogenen Kohlenstoffe** beziehen als freigesetztes CO₂ auf den Gesamtwert Treibhausgasemissionen des jeweiligen Gebäudes.

Erhöhung der Resilienz und Senkenleistung des Waldes

Auch für den Wald kann der Holzbau Benefits erbringen. Damit langfristig genügend Holz für den Holzbau zur Verfügung steht und das Klimapotential des Waldes optimal genutzt wird, muss Holz für den Holzbau aus im Sinne des Klimaschutzes nachhaltig bewirtschafteten Wäldern stammen. Das wird auch «climate smart forestry» (CSR) genannt und ist ein neuer Zweig der nachhaltigen Waldbewirtschaftung, der darauf abzielt, die Wälder mit Abstimmung auf den Klimawandel zu bewirtschaften. Diese Bewirtschaftung bietet Schutz Entwaldung, Unternutzung und Überalterung. Unter dieser Voraussetzung können die Waldgesundheit und die Multifunktionalität des Waldes als

weitere Co-Benefits des Holzbaus identifiziert werden. Diese Methode führt auch dazu, dass mehr Holz nachwächst, wodurch mehr CO₂ im Wald sequestriert wird und mehr Holz für den Bau zur Verfügung steht (Vgl. Abbildung 15).

Die Unternutzung des Waldes kann zu einem höheren Waldbrandrisiko und der Anfälligkeit für Schädlingsbefall führen (Rey and Thalmann 2017; Verkerk et al. 2020). Im Wald wird zudem das meiste CO₂-sequestriert, wenn die Holznutzung dem Waldzuwachs entspricht (Rey and Thalmann 2017). Die erhöhte Holznutzung insbesondere in überalterten Wäldern oder Schutzwäldern der Schweiz durch Verjüngung wirkt sich zusätzlich positiv auf die Klima Resilienz des Waldes gegen Extremwetterereignissen aus, da alte Bäume oft nicht so klimaresistent sind, weil durch vermehrte Trockenheitsperioden und andere Extremwetterereignisse Fichte, Tanne etc. an bestimmten Orten nicht mehr überleben können. Die Höhenmeter, in denen diese Bäume gut wachsen, verändert sich durch den Klimawandel, welchem durch das Waldmanagement Rechnung getragen werden kann.

Nicht-Klimarelevante Co-Benefits

Reduktion der Zerstörung der Natur

Zudem ist Konstruktionsholz im Gegensatz zu nicht biogenen Baustoffen dahingehend im Vorteil, dass ausser den aktuell verwendeten fossilen Rohstoffen für die Klebstoffproduktion keine Gesteine und Erze mechanisch aus dem Boden entfernt werden müssen (Ramage et al. 2017) und als einzige CCS Technologie nachwächst, weshalb sie auch «Nature based Solution» genannt wird.

Steigerung der Biodiversität

Alte und tote Bäume tragen zur Artenvielfalt bei, weil sie ein Zuhause für andere Lebewesen darstellen - Totholz wird auch beim Waldmanagement oft liegengelassen. Durch ein modernes klimagerechtes Waldmanagement findet eine Verjüngung und Diversifizierung statt, weil hier nicht nur Monokulturen gepflanzt werden. Damit wird auch die Biodiversität gesteigert.

Vermeidung von Abfall und Förderung der Kreislaufwirtschaft

Die Wiederverwendung von Holzbauteilen schreitet rasant voran, die Kreislaufwirtschaft und die verbesserten Ressourceneffizienz nimmt zu (Müller and Moser 2022). Heutige demontierbar geplante Holzbauten können am Lebensende nach ca. 100 Jahren der Demontage und stofflichen Verwendung zugeführt werden. Schon heute werden am Markt Holzbalken mit Rücknahmegarantie verkauft oder geleast und es entstehen Datenbanken mit allen verbauten Holzbauelementen.²⁰

2.3.4 Risiken

Permanenz

Die rechtliche Sicherstellung der Permanenz des Kohlenstoffs im Gebäude oder Baustoff ist eine Herausforderung. In der Schweiz beträgt die Permanenz-Anforderung 30 Jahre, international 100 Jahre. Das bedeutet, dass der Kohlenstoff 30 bzw. 100 Jahre lang im Gebäude gebunden werden muss, um als CO₂-Speicher angerechnet zu werden (Frischknecht and Pfäffi 2023). Des Weiteren besteht das Risiko, dass Konstruktionsholz nach seinem Einsatz im Gebäude beim Rückbau ohne Kohlenstoffabscheidung oder die Weiterverwertung zu Pflanzenkohle energetisch verwertet wird. Dies führt dazu, dass der gespeicherte Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre entweicht. Um diesem Risiko vorzubeugen, werden in Frischknecht und Pfäffi (2023) zwei Vorschläge zur Rechtsverbindlichkeit der Permanenz gemacht:

- Ein Eintrag im Grundbuch soll gewährleisten, «dass Materialien, die biogenen Kohlenstoff enthalten entweder wiederverwendet, rezykliert oder dann permanent gespeichert werden. Im Falle eines Rezyklierens oder einer Wiederverwendung muss die Partei, die die Baumaterialien/Bauelemente abnimmt, eine analoge rechtliche Verpflichtung eingehen» (Frischknecht and Pfäffi 2023, p. 31).

²⁰ Siehe zum Beispiel <https://derix.de/nachhaltigkeit-im-holzbau/nachhaltig-bauen-mit-holz/> und <https://www.holzbauaustria.at/technik/2021/06/kreislaufwirtschaft-im-holzbau-beginnt.html>

- Eine Rücknahmegarantie und vorgezogene Stilllegungsgebühr kann Hersteller und Lieferanten verpflichten, Material aus Rückbauten zurückzunehmen. Gleichzeitig wird auch die Entsorgung von biogenen Baustoffen ohne CCS verboten werden (Frischknecht and Pfäffi 2023).

Entwaldung

Die Voraussetzung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung für den Holzbau als Negativemissionstechnologie wurde bereits erläutert. Das Risiko der Entwaldung und Übernutzung der Wälder darf jedoch nicht ausser Acht gelassen werden, dass neben den höheren CO₂ Emissionen auch Verluste der Walddienstleistungen wie Biodiversität, Luft- und Wasserqualität erzeugen könnte und die langfristige nachhaltige Bereitstellung von Rundholz für den Holzbau nicht gesichert wäre (P. Smith et al. 2019).

Knappheiten im Holzmarkt

Im Rahmen der Dekarbonisierung der Wärmewirtschaft wird Holz eine immer wichtigere Rolle spielen und die Nachfrage gesteigert, da Hunderte von neuen Wärmeverbünden geplant sind. Die absehbare Knappheit an Energieholz wird zu einem Preisdruck führen, der sich auch auf das bisherige Hauptsegment, nämlich des sägefähigen Rundholzes für den Holzbau auswirken wird. Es ist fraglich, ob die Baubranche preislich mithalten kann, da einmal gebaute Wärmeverbünde nicht stillgelegt werden können, während in der Baubranche alternativen existieren. Daher ist zu befürchten, dass zukünftig deutlich mehr sägefähiges Stammholz verbrannt wird, anstelle über Sägereien zum Konstruktionsholzmarkt zugeführt werden. Diese negativen Entwicklungen müssen durch entsprechende Rahmenbedingungen und Vorschriften verhindert werden, da Holz im Bau einen höheren gesellschaftlichen Nutzen hat.

2.3.5 Schätzungen der Kosten, des Potentials und der wichtigsten Treiber

Kosten

Mehrere Studien untersuchen die Holzbaukosten und vergleichen die Ergebnisse mit dem Massivbau. In den Studien werden die Mehrkosten mehrheitlich pro m² Hauptnutzfläche (HNF) berechnet. Aus dem Blickwinkel von NETs ist es wichtig zu verstehen, welche Kosten spezifisch für die CO₂-Speicherung durch die vermehrte Anwendung des Ingenieurholzbaus entstehen.

Dazu werden zum einen die bestehenden Kostenanalysen und zum anderen interne Fallbeispiele analysiert und ausgewertet. Allerdings werden ausschliesslich die Erstellungskosten der tragenden Strukturen von Gebäuden nach dem Baukostenplan Hochbau betrachtet, da die Tragstruktur ca. 80% des gesamten Investitionsvolumens von Wohn-, Industrie- und Gewerbegebäude ausmacht.

Die bestehenden Studien weisen unterschiedliche Kostenschätzungen aus. Die Studie von Selberherr und Kollegen (Selberherr et al. 2020) zeigt für Holzbaumehrfamilienhäuser im Vergleich zum traditionellen Massivbau auf BKP-Ebene Mehrkosten von etwa 17% im 50%-Quantil auf. In den extremen Quantilen werden Holzbaumehrkosten von 33 % (10 %-Quantil) und von -21 % (90 %-Quantil) ermittelt (Selberherr et al. 2020). Der Schlussbericht von Pirmin Jung in 2015, legt wiederum abweichende Mehrkostenkennwerte für die Erstellungskosten dar, die nach Standard nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) berechnet wurden. Die Studie zeigt, dass Mehrfamilienhäuser (MFH) mit einer Holzbauweise in der Tragstruktur ca. 4.5 % teurer sind als mit einer Massivbauweise (Müller et al. 2015).

In weiteren Studien entsprechen die Holzbaumehrkosten auf BKP2 Ebene ca. 24 %. Aus Gesprächen mit Investoren, Projektentwicklern sowie Ingenieuren wird identifiziert, dass die unterschiedlichen Ergebnisse aus den Studien mit der Erfahrung in der Umsetzung von Holzbauten zusammenhängen. Aus diesem Grund vertreten viele Investoren und Projektentwickler die Meinung, dass die Holzbauweise ca. 15% teurer ist als die Massivbauweise. Für Bürogebäude ist die Holzbauweise kompetitiver als im Wohnungsbau (Selberherr et al. 2022).

Die Ergebnisse der internen Fallbeispiele zeigen die Mehrkosten der meistverwendeten Holzbauprodukte in tragenden Konstruktionen gegenüber den traditionell verwendeten Produkten Stahl

235 und Beton C25/30. Folgende Holzbauprodukte wurden den traditionellen Produkten gegenübergestellt: Brettschichtholz, Brettsperrholz, Furnierschichtholz, Massivholz (Vollholz) und Modulbauweise. Dabei werden die Bauweisen nach ihrer Funktionserfüllung verglichen. Das Volumen von Stahl oder Beton kann bis 20% geringer sein als in der Holzbauweise. Die Kosten der Analyse werden pro Kubikmeter Holz aufgezeigt, wodurch die Mehrkosten des Holzbaus direkt in Relation mit der CO₂-Speicherung gesetzt werden können. Allgemein wurde ein Median von ca. 14% berechnet, wobei die Mehrkosten pro Bauelement zwischen 5% bis max. 50% variieren. Abbildung 12 veranschaulicht die Holzbaumehrkosten auf eBKP-H Ebene. Die Kosten sind abhängig von der Produktwahl in den Elementgruppen der Hauptgruppe C «Konstruktion Gebäude». Dabei entstehen die maximalen Kostenunterschiede in der Wahl der tragenden Stützen und die geringsten Kostenunterschiede in der Deckenkonstruktion.

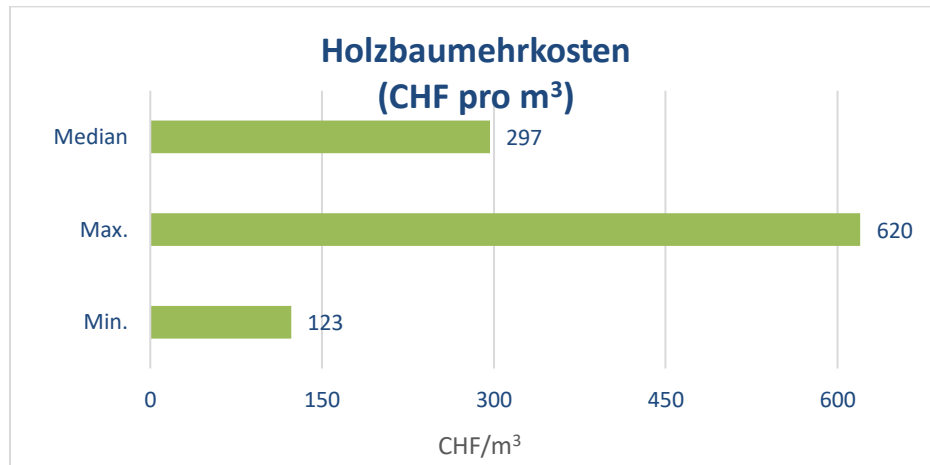


Abbildung 12: Holzbaumehrkosten für eingebaute Bauprodukte in den tragenden Konstruktionen verglichen mit den traditionell verwendeten und funktional äquivalenten Mengen von Massivbauprodukten Stahl 235 und Beton C25/30 (eigene unveröffentlichte Berechnungen, Timber Finance Initiative, 2023).

Aus den vorläufigen Ergebnissen aus der Studienrecherche sowie der Fallbeispielanalyse kann dargelegt werden, dass die tragenden Konstruktionen in Holzbauweise ca. 10-14 % teurer sind als in Massivbauweise. Die Wahl der Produkte in den einzelnen Elementgruppen hat einen starken Einfluss auf die Erstellungskosten.

Mit der vereinfachten Annahme, dass pro 1m³ verbautes Holz 1 tCO₂eq gespeichert wird, kann aus der internen Fallbeispielanalyse geschlossen werden, **dass 1 tCO₂eq gespeichert im Bau rund CHF 300 kostet** (siehe Abbildung 12, eigene unveröffentlichte Berechnungen, Timber Finance Initiative, 2023). Die Kosten könnten weiter reduziert werden, wenn die Emissionsvermeidung durch Substitution von Beton und Stahl mitgerechnet würde. Dabei muss darauf geachtet werden, dass Doppelzählungen vermieden werden.

Mit steigenden Erkenntnisgewinnen in der Baubranche wird erwartet, dass sich die Mehrkosten des Holzbaus reduzieren. Wie oben bereits erwähnt, sind die Kosten stark von der Erfahrung in der Planung und Umsetzung von Holzbauten abhängig.

Potentiale

Die Wahl der Baumaterialien für die tragenden Konstruktionen von mehrgeschossigen Gebäuden wird von der Zement- und Stahlindustrie in der Schweiz und weltweit dominiert. Dabei ist die Schweiz mit einer Holzbauquote von 15 % weltweit führend. Im globalen Kontext wird der Ingenieurholzbau nur zu 0.5 % angewendet (Churkina et al. 2020). Obwohl in der Schweiz 15% der Mehrfamilienhäuser (MFH) mit einer tragender Struktur in Holzbauweise realisiert werden, haben die traditionellen Massivbaustoffe

Zement, Stahl und Backstein einen Marktanteil von 95 % im gesamten Bausektor, wo der Holzbauanteil unter 5% liegt.²¹

Zuallererst muss erwähnt werden, dass das Potential des Holzbaus von zwei Faktoren eingeschränkt wird. Zum einen limitiert die Holzverfügbarkeit und zum anderen die zyklische Bautätigkeit bzw. die Neu- und Ersatzbauquote des Bausektors die Potentiale des Holzbaus. Allerdings ist der Holzbau aufgrund der fortschreitenden Technologieanwendung und bestehenden Infrastruktur in der Produktion und Verarbeitung eine der skalierbarsten NETs, die der Schweiz zur Verfügung stehen. Aktuell erreicht die Schweiz ihr Holzbaupotential nicht, da noch 95 % die emissionsintensiven Materialien S235 und C25/30 in den tragenden Konstruktionen verbaut werden

Das Potential des Ingenieurholzbaus mit nachhaltigem Waldmanagement wird im Rahmen dieses Berichtes mittels zwei Szenarien berechnet, welche in Abbildung 13 dargestellt sind. Das erste Szenario «CH-Holz» zeigt das Holzbaupotential mit Verbau von ausschliesslich Schweizer Holz in der Tragstruktur. In dem zweiten Szenario «CH-Gebäudepark» zeigt sich der maximale Holzeinsatz inkl. Import im Schweizer Bausektor.

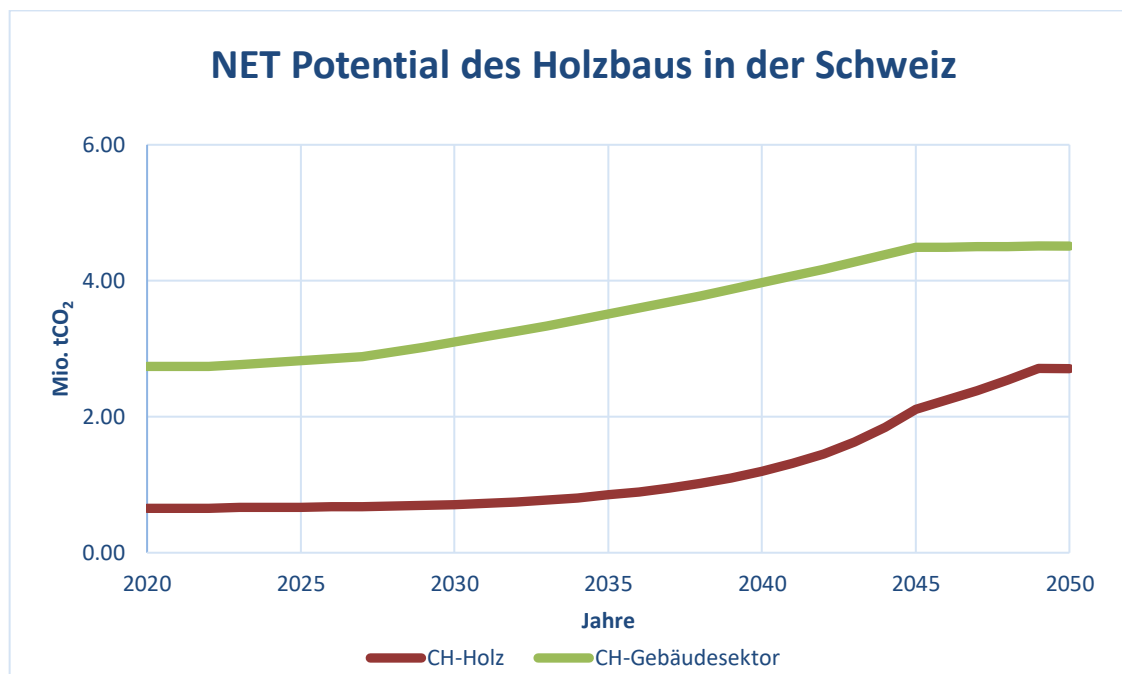


Abbildung 13: Vergleich der Szenarien CH-Holz im Bau in rot und CH-Gebäudepark. Dabei entspricht das Potential des Gebäudeparks der maximalen Holzbauförderung im Schweizer Bausektor.

Das Szenario «CH-Holz» ist abhängig von der Schweizer Holzernte und Verarbeitung. Der Schweizer Waldbestand hat in den letzten Jahren weiter zugenommen, mit einer durchschnittlichen Zuwachsrate von 10 Mio. m³ pro Jahr. Die derzeitige Holzernte von 5.9 Mio. m³ pro Jahr liegt ca. 30 % unter dem wirtschaftlichen Erntepotential. Dadurch stehen Waldbesitzende vor der Herausforderung überalterter Wälder, die dem Klimawandel vermehrt ausgesetzt sind. Aktuell werden ca. 37 % (2.2 Mio. m³) der Holzernte für Stammholz verwendet, das zu ca. 653'000 m³ Bauholz verarbeitet werden kann. Allerdings sind 2022 in der Schweiz nur ca. 208'000 m³ Leimholz produziert worden (Lädrach 2022).

Bis zu 8.5 Mio. m³ Holz kann man dem Schweizer Wald entnehmen, und dabei gleichzeitig die Gesundheit und Multifunktionalität der Wälder stärken und durch die priorisierte Verwendung des CH-

²¹ <https://baumeister.swiss/modernisierungsoffensive-des-gebaeudeparks-muss-sich-auf-alle-baustoffe-abstuetzen/>

Holzes als Bauholz bis zu **1.2 Mio. tCO₂eq** jährlich zusätzlich im Bau speichern.²² Bis 2050 könnten mit maximalem Einsatz von CH-Holz im Bau kumuliert 36.08 Mio. tCO₂eq gespeichert werden (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022).

Das Szenario 2 «CH-Gebäudepark» berechnet den maximalen Einsatz von Holz im Gebäudesektor. Dabei wird sich auf die Studie von Savi und Klingler 2022 bezogen, in der der maximale Holzbaueinsatz 8.3 Mio. Tonnen an waldfischem Holz benötigt (Savi and Klingler 2022). Das entspricht einem jährlichen potenziellen Verbau von ca. 4.5 Mio. m³ Konstruktionsholz im Schweizer Bausektor. Dabei müsste der Holzbau mit sofortiger Wirkung gefördert werden. Mit der Annahme, dass das Potential des Gebäudesektors in 2050 ausgeschöpft wird, werden kumuliert 103 Mio. tCO₂eq über den Zeitraum langfristig im Bau gespeichert. Das entspricht einer jährlichen CO₂-Speicherung von 3.52 Mio. tCO₂eq, d.h. durch Importe kann die jährliche Speicherung fast verdreifacht werden.

Das Szenario «CH-Holz» schöpft bis 2050 das Potential des Schweizer Waldes aus. Dabei kann das Szenario jährlich ca. 1.2 Mio. tCO₂eq dem Bausektor bereitstellen. Aber dies erfordert Investitionen in die Waldbewirtschaftung sowie die darauffolgenden Verarbeitungsstufen. Das betrifft besonders die stoffliche Verwertung von Laubholz, das aktuell zu 70 % energetisch genutzt wird. Im Szenario «CH-Gebäudepark» wird die Kapazität des Schweizer Waldes offensichtlich überschritten. Aktuell werden ca. 75 % des Bauholzes importiert (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2022). Falls die Schweiz das gesamte Holzbaupotential des Bausektors ausschöpfen möchte, muss zu einem die CH-Holzverfügbarkeit, wie unter Szenario «CH-Holz» signifikant steigen und trotzdem müssen noch ca. 65% Bauholz importiert werden. In der Abbildung 14 wird die kumulierte Menge an CH-Holz und importiertem Holz dargestellt.

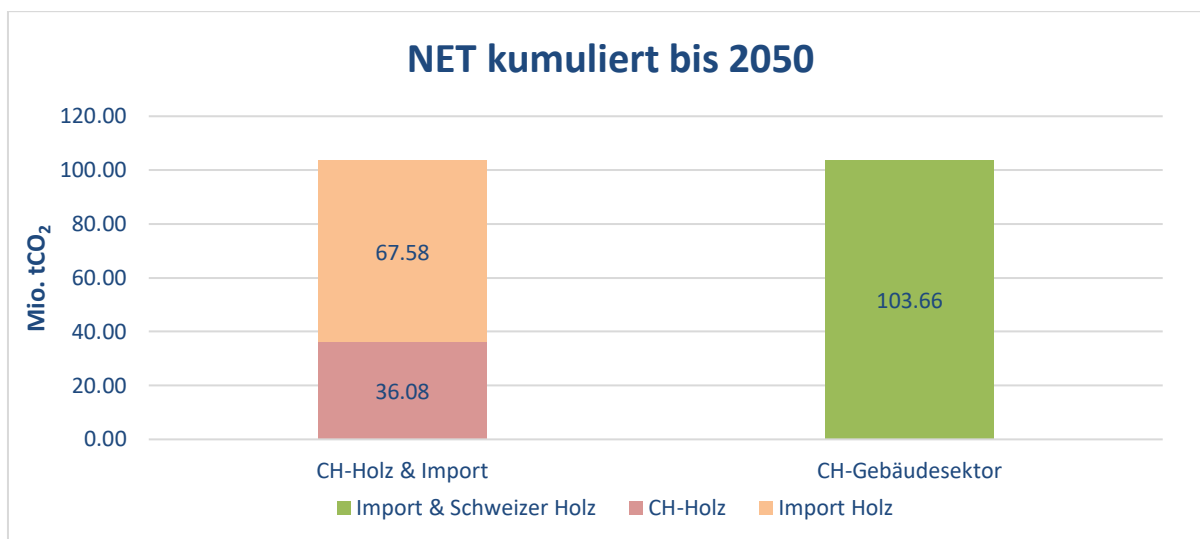


Abbildung 14: Gegenüberstellung des kumulierten Potentials des Gebäudesektors mit der Feststellung, dass ca. 65% des benötigten Bauholzes importiert wird.

Beide Szenarien beruhen auf der optimalen Holzverwendung und benötigen eine priorisierte stoffliche Verwertung von Holz. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Konstruktionsholz langfristig im Gebäude gespeichert wird und die Permanenz-Kriterien von mind. 100 Jahren erfüllt werden. Allerdings erfordern beide Szenarien Massnahmen im Wald, Förderungen der gesamten Wald- und Holzketten, Förderung der Holzbaunachfrage, Sensibilisierung der Investoren sowie weiterhin hohe Mengen an importiertem Konstruktionsholz.

²² Das wirtschaftliche Holzerntepotential ist ca. 8.5 Mio. m³. Aktuell werden ca. 5.5 Mio. m³ geerntet. Die restlichen 3 Mio. m³ verbleiben im Wald und mit einem Wertschöpfungsfaktor von ca. 0.4 pro m³ geht man von einem zusätzlichen Konstruktionsholzpotalential von 1.2 Mio. m³ aus (0.4 * 3 Mio. m³). Allerdings kann man nicht alle Ressourcen sofort aktivieren. Dafür muss eine aktive Waldbewirtschaftung umgesetzt werden, die Industrie muss dazu wachsen zusätzlich muss in die Infrastruktur investiert werden.

Die vorliegenden Berechnungen und Simulationen beziehen sich auf die derzeitige Holzernte und beinhalten noch nicht mögliche Steigerung durch Massnahmen im Wald durch «Climate Smart Forestry» (Waldbau, Baumarten etc., vgl. Abbildung 15). Mit dieser etwas aufwendigeren Bewirtschaftung könnte der jährliche Holz-Zuwachs von 8.5 Festmeter/ha/Jahr auf 17 Festmeter/ha/Jahr verdoppelt werden. Bei optimaler Förderung der Natur wird gleichzeitig mehr CO₂ im Wald sequestriert wie auch Holz für den Bau erzeugt, durch schnelleres Wachstum eines verjüngten, diversen Waldes. Wie Abbildung 15 veranschaulicht, ist der Zuwachs pro Jahr und Hektare abhängig von der Baumart und dem Baumalter. Das Baumwachstum pro Jahr und Hektare ist proportional zur Sequestrierungsrate. Die beste CO₂-Absorptionsleistung wird erreicht, wenn auf maximal mögliche Sequestrierung und gleichzeitig für die verarbeitende Industrie optimale Baum-Durchmesser optimiert wird.

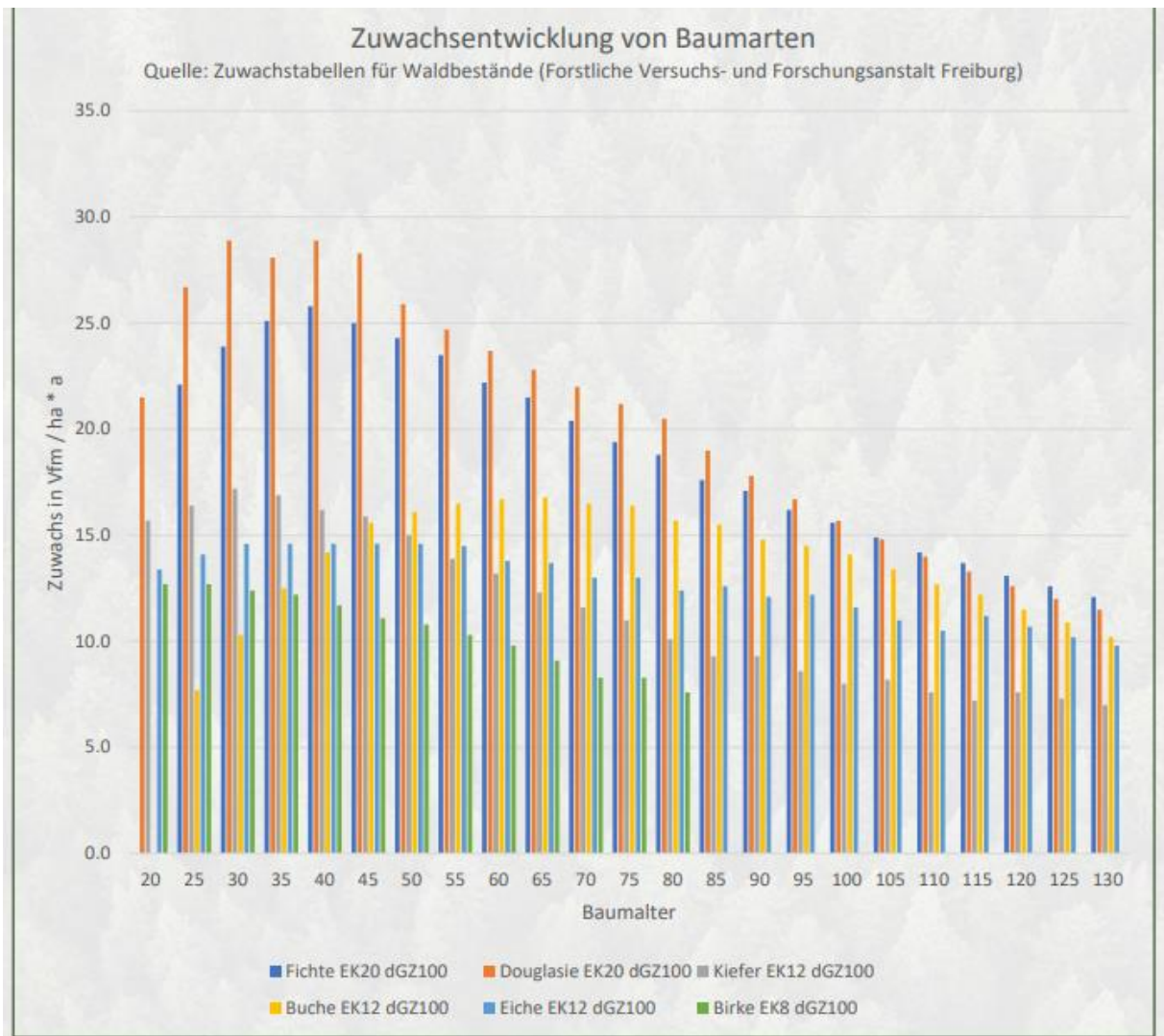


Abbildung 15: Zuwachstabellen Baumarten (Quelle: S. Flückiger, Vortrag an S-WIN Wintertagung vom 26.1.2023, unveröffentlicht)

Anmerkung: EKX = Ertragsklasse mit Zuwachs von X Festmetern pro Jahr und Hektare; dGZY = Bei einem durchschnittlichen Gesamtzuwachs auf Y Jahre. Lesebeispiel anhand der Baumart Fichte EK20 dGZ100: Die Fichte wächst innert 100 Jahren durchschnittlich 20 Festmeter pro Jahr und Hektare zu. Bei einem Baumalter von 45 Jahren beträgt der Zuwachs 25 Kubikmeter pro Festmeter und Jahr, wobei der Vorratsfestmeter (Vfm) als Kreisfläche des Baumes auf Brusthöhe multipliziert mit der Baumhöhe und der Baumartenabhängigen Formzahl definiert ist.

Im Kontext der Schweizer Treibhausgasemissionen von ca. 46 Mio. tCO₂eq pro Jahr könnte der Holzbau bei maximaler Förderung (Szenario 2 «CH-Gebäudesektor») mit sofortiger Wirkung ca. 10 % speichern, sogar ohne die Co-Benefits durch die Substitution und die höhere Sequestrierungsrate einzurechnen.

Im Rahmen des Holzbaus muss neben Finanzierungsinstrumenten und -policies auch Investitionskapital in die Holzindustriekette fliessen, um das Mehrangebot an Schweizer Holz auch verarbeiten zu können und so das Holzbaupotential maximal auszuschöpfen. Die Erhöhung des Holzangebots und der Holzbaunachfrage müssen weiterhin finanziell unterstützt werden und dabei die Nachfrage bei Investoren durch Wissensvermittlung und Bereitstellung von Holzbau-Expertise zusätzlich gefördert werden.

Zusammengefasst kann man zum Potential von TCCS folgende Punkte aufführen:

(S. Flückiger, Vortrag an S-WIN Wintertagung vom 26.1.2023, unveröffentlicht)

- Schweizer Waldfläche: 1.31 Mio Hektar
- Nutzbare Schweizer Waldfläche: 0.655 Mio Hektar
- Zuwachs Schweiz Aktuell: 8.5 fm/ha/a => 4.7 Mio fm/a
- Zuwachs Climate Smart Forestry: 17 fm/ha/a => 9.5 Mio fm/a
- Vorrat Schweiz: 374 fm/ha (Batterie ist fast voll)
- USP und Potential vom Wald liegen beim Zuwachs

2.3.6 Relevante Akteure

Die für TCCS relevanten Akteure wurden mittels eines Stakeholdermappings identifiziert. Die von kleinen und mittelständischen Betrieben geprägte Holzbauszene in der Schweiz ist dank ihrer langen generationenübergreifenden Geschichte mit vielen Akteuren sehr etabliert. Sie ist seit der «Holzwende 2020» für neue Herausforderungen gut aufgestellt, dank der steigenden Preise, durch den Generationenwechsel bei den Eigentümern, Firmen, die in jeder Stufe der Wertschöpfungskette aktiv sind, einem guten Umweltbewusstsein, Innovationsdrang und aktiver Institutionen, die die gesamte Kette von einem übergeordneten Standpunkt aus verwalten.

Folgende Akteure wurden als Treiber für die Entwicklung und Etablierung von TCCS in der Schweiz identifiziert:

- **Bundesamt für Umwelt (BAFU):** Das BAFU bietet mit seinem Departement Wald und dem Aktionsplan Holz Wissenstransfer sowie Fördermittel. Es setzt sich für den stofflichen Einsatz von Holz im Bau als CO₂-Speicher ein.
- **Firmen und Organisationen** entlang der gesamten Wertschöpfungskette Wald und Holz(bau), welche als Multiplikatoren bzgl. Wissenstransfer, und der Kommunikation und Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards und Berechnungsstandards bzgl. Kohlenstoffspeicherung im Holzbau agieren können sind:
 - **Swiss Wood Innovation Network** (S-Win), welches den Austausch zwischen Forschungsinstitutionen und Bauunternehmen im Holzbau unterstützt.
 - **Lignum**, welche die Holzbaubranche mit der Bereitstellung von technischen Grundlagen und Richtwerten für den Holzbau unterstützen.
 - **Holzbau Schweiz** setzen sich für den vermehrten Einsatz von Holz im Bauwesen ein.
 - **Swiss Timber Engineers** ist der Verband der Holzingenieur:innen, welcher den Wissenstransfer von Forschung zur Praxis gewährleistet.
 - **Wald Schweiz** ist der Verband der Waldeigentümer und setzt sich für Rahmenbedingungen ein, welche es den Forstbetrieben erlauben, den Schweizer Wald ökonomisch und ökologisch nachhaltig zu bewirtschaften.²³
 - **SIA** ist der schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, der u.a. Normen im Baubereich erarbeitet und Praktizierenden bereitstellt. Zu TCCS sind den Autoren keine Arbeiten bekannt, jedoch ist der SIA ein wichtiger Multiplikator für allfällige Standards bzgl. Permanenz und Kohlenstoffspeicherung in Holzgebäuden.

²³ <https://www.waldschweiz.ch/de/verband/wer-wir-sind>

- **Verein Senke Schweizer Holz**, der rund 150 Sägewerke und Holzwerkstoffplatten-Produzenten verbindet, die sich für einen vermehrten Einsatz von Holz als CO₂-Senke einsetzen.
 - **Verein Wald-Klimaschutz Schweiz** begleitet CO₂-Senken-Projekte im Wald.
 - **Timber Finance Initiative**, die den ersten Standard zur Monetarisierung der CO₂-Speicherleistung in MFH mit der Organisation Verra erarbeitet haben
 - **Treeze** ist spezialisiert auf die Ökobilanzierung von Bauprodukten und erarbeitet in Zusammenarbeit mit verschiedenen Institutionen wissenschaftliche Publikationen zur Anrechnung und Berechnung der CO₂-Speicherleistung im Holzbau
 - Die in Industrieverbänden wie **HIS** vereinen Holzbaufirmen
 - Holzbauingenieurbetriebe wie **Timbatec**, **Pirmin Jung** etc, die den Holzbau in Zusammenarbeit mit der Wissenschaft (ETH, EMPA, BFH)
 - **Wüest Partner**, welche im Auftrag des Bundesamts für Umwelt Studien zum Holzbaupotential und dessen Kosten durchführen, die an Grossinvestor:innen gerichtet sind.
 - **Klimarappen und Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation (Klik)**, welche eine Rolle in der Finanzierung von Holzsenkenprojekten spielen.
- Für die Bereitstellung von Wissen sind diverse **Schweizer Hochschulen**, besonders die Folgenden, als wichtige Akteure identifiziert.
 - Die **ETHZ und PSI** erarbeitet neben Lebenszyklusanalysen auch Grundlagen für die Baustoffentwicklung und -Prüfung.
 - Die **Berner Fachhochschule BFH** erarbeitet ebenfalls die Grundlagen zu Baumaterialien, und untersucht die Holznutzung in der Schweiz.
 - Das **WSL** erarbeitet und untersucht u.a. Waldbewirtschaftungsszenarien der Zukunft sowie deren Auswirkung auf die mögliche Entwicklung im Holzbau.
 - **Verwaltung:**
 - Die **Stadt Zürich**, Amt für Hochbauten, ist aktiv in der Erarbeitung und Untersuchung der Grundlagen für Potenziale und Anrechnungsmethoden bezüglich des Holzbaus als Kohlenstoffspeicher.

2.3.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize

In der Schweiz

Das Waldgesetz sieht in Art. 34 b die Förderung der Verwendung von nachhaltig erzeugtem Holz für den Bau von Bundesgebäuden vor. Abgesehen von diesem Artikel sind uns keine spezifischen politischen Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Holz im Bauwesen in der Schweiz bekannt. Allerdings sieht das kürzlich verabschiedete Bundesgesetz über Klimaschutzziele, Innovation und Energiesicherheit²⁴ vor, dass Bundes- und kantonale Verwaltungen als Vorbild fungieren und bis zum Jahr 2040 Netto-Null-Emissionen erreichen sollen (Art. 10). Zusätzlich soll das revidierte Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen sowie die entsprechende Verordnung²⁵ dem Thema Nachhaltigkeit und der Einhaltung des Umweltrechts mehr Gewicht beimessen. Deshalb scheint es wahrscheinlich, dass mehr Instrumente zur Förderung nachhaltiger Gebäude im Rahmen des öffentlichen Beschaffungswesens verabschiedet werden.

So wurde beispielsweise eine Plattform für den Wissensaustausch über nachhaltige öffentliche Beschaffung²⁶ eingerichtet. Darüber hinaus beginnen einige Kommunalverwaltungen damit, Anforderungen an nachhaltiges Bauen festzulegen, z.B. müssen alle neuen Regierungsgebäude in der Stadt Zürich dem Green-Building-Standard Minergie-Eco entsprechen, der für bestimmte

²⁴ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2022/2403/de>

²⁵ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2020/126/de> und <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2020/127/de>

²⁶ <https://www.woeb.swiss/de/>

Gebäudetypen ein Ziel für den enthaltenen Kohlenstoff enthält (Think Wood 2021). Darüber hinaus hat die Stadt ein 2050 Ziel für den im gesamten Lebenszyklus entstehenden Kohlenstoff in Wohngebäuden festgelegt.

Ein weiterer Ansatz ist die parlamentarische Initiative zur "Stärkung der Kreislaufwirtschaft": Die UREK-S (Umwelt, Raumplanung und Energie des Ständerats) wird sich voraussichtlich bis Ende 2023 damit befassen, ein Inkrafttreten ist frühestens 2025 möglich. Der Nationalrat hat im Mai darüber entschieden; umstritten waren die Grenzwerte für graue Treibhausgasemissionen bei Gebäuden. Es zeigt sich also, dass das Thema in der Politik angekommen ist.

Im Jahr 2017 wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 ein [Projekt zum Thema Holz im Bauwesen](#) ⁽²⁷⁾ durchgeführt, in dem einige Empfehlungen ausgesprochen wurden, doch scheint es noch keine entsprechenden Maßnahmen zu geben.

Über diese politischen Maßnahmen und Forschungsinitiativen hinaus gibt es einige Initiativen zur Förderung der Verwendung von Holz im Bauwesen als Kompensationsprojekte sowohl im Rahmen der Compliance- als auch der freiwilligen Kohlenstoffmärkte. Die Schweiz ist international das einzige Land, das mit der Trägerschaft Verein Holzsenke Schweiz seit 2014 ein Programm zur Abgeltung der Klimaleistung des Holzes im regulierten CO₂-Markt implementiert hat ([Klik, Programm 055](#)).²⁸ Mit diesem Programm, finanziert aus Treibstoffabgaben, werden unwirtschaftliche Investitionen auf der 2. Bearbeitungsstufe der Sägereien finanziert, mit dem Ziel deren Klimaleistung zu entschädigen, indem sie den Baustoff über Investitionen konkurrenzfähiger machen. Das laufende Programm wirkt nur indirekt auf die Angebotsseite (Wald) oder Nachfrageseite (Investoren von Holzbauten). Es entspricht nicht mehr heutigen internationalen Anforderungen und läuft daher 2030 vermutlich aus, da der Permanenzfaktor und damit die Speicherleistung nicht garantiert und monetarisiert werden kann. Neben diesem BAFU-Programm gibt es noch einige private Initiativen auf dem freiwilligen Markt, wobei die meisten nicht nach einem hohen ICROA-Standard akkreditiert sind.

Die Puro.Earth Methodologie "Bio-based Construction Materials" wurde mittlerweile eingestellt.

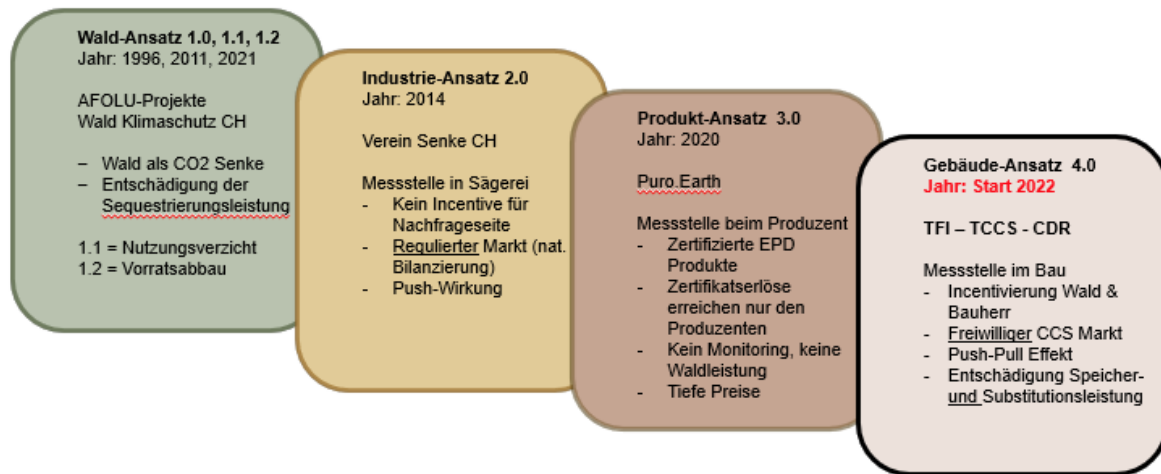
Abbildung 16 zeigt, dass sich die Ansätze vom Waldfokus über den Industrie- bis zum Holzbaufokus entwickelt haben. Diese Entwicklung ist wohl darauf zurückzuführen, dass im Holzbau die Permanenz, das heisst die langfristige Speicherung, besser erreicht und monetarisiert werden kann. Auf internationaler Ebene sind Waldprojekte auch mit dem Ziel die Wälder in Entwicklungsländern zu schützen entstanden, wobei dieser Fokus für die Schweiz mit regulierten Wäldern kaum relevant ist. Sämtliche Waldansätze haben – vom Waldschutz her denkend - zu einem Vorratsaufbau und nicht zu einer nachhaltigen, im Gleichgewicht zwischen Wachstum und Ernte stehenden Holznutzung geführt, indem sie den Holzvorratsaufbau im Wald monetarisieren und nicht die nachhaltige Holznutzung.

International

Auf internationaler Ebene haben verschiedene Länder und subnationale Gerichtsbarkeiten Anreizsysteme für emissionsärmere Gebäude eingeführt, aber diese Systeme berücksichtigen nicht die Kohlenstoff-Entfernung aus der Atmosphäre (Amiri et al. 2020). Relativ weit verbreitet sind Vorschriften für staatlichen Behörden den gebundenen Kohlenstoff in neuen Bau- oder Infrastrukturprojekten zu berücksichtigen und/oder zu reduzieren. In den USA haben mehrere Bundesstaaten und Städte derartige Vorschriften erlassen, darunter das Gesetz Buy Clean California von 2017, der Green New Deal von Los Angeles von 2020 und die Durchführungsverordnung State Efficiency and Environmental Performance von 2018 im Bundesstaat Washington, um nur einige zu nennen (Think Wood 2021).

²⁷ <https://www.nfp66.ch/de/Ws1uaskDbEmHileQ/seite/ergebnisse>

²⁸ <https://www.klik.ch/factsheet/index.html?fsid=28&generation=enforce>



Quelle:
Churkina et al. (2020), Buildings as a global carbon sink, nature sustainability
Perspective
Kompensationsprojekt Senke Schweizer Holz (2014).
Puro.earth (2020); Puro Rule CO2 removal marketplace v2.0 final.

13

Copyright 2022, Timber Finance Initiative. All Right Reserved

Anmerkung: Die Puro.Earth Methodologie "Bio-based Construction Materials" wurde mittlerweile eingestellt.

Abbildung 16: Entwicklung von Ansätzen zur Zertifizierung und Abgeltung von TCCS (Timber Finance Initiative, 2022),

In Europa fordert der Green Deal der EU Gebäude, die sich an der Kreislaufwirtschaft orientieren. Holz kann dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen. Das französische Programm Energie Carbone (neu Energie Positive et Réduction Carbone), das von der Regierung und der Bauindustrie ins Leben gerufen wurde, will Experimente fördern, um sogar Energie aus Gebäuden zu gewinnen und deren Kohlenstoffemissionen während ihres gesamten Lebenszykluses zu senken. Um diese Ziele zu erreichen, werden Anreize geboten, wie z.B. die Zulassung einer höheren Baudichte (als die Zone erlaubt) für Gebäude, die bestimmte Leistungsziele nachweisen, sowie ein Kennzeichnungssystem, das das Leistungsniveau des Gebäudes in Bezug auf Energieeffizienz und gebundenen Kohlenstoff angibt. Im Februar 2020 kündigte Präsident Macron an, dass alle neuen öffentlichen Gebäude ab 2023 zu 50% aus Holz oder einem anderen Biomaterial bestehen sollen. Diese Maßnahme wurde durch das Mandat von Paris inspiriert, Holz in Gebäuden für die Olympischen Spiele 2024 zu verwenden. Belgien hat ein eigenes LCA-Tool für Baumaterialien entwickelt und verlangt nun von den Herstellern von Bauprodukten die Vorlage von Umweltproduktdeklarationen (EPDs), in denen die Ergebnisse einer LCA zusammengefasst sind. Seit 2012 müssen in den Niederlanden alle neuen Wohn- und Bürogebäude mit einer Fläche von mehr als 100 m² ihr Umweltprofil sowie den gebundenen Kohlenstoff angeben. Seit 2018 gibt es darüber hinaus Schwellenwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Das schwedische Baugesetzbuch enthält strenge Energieanforderungen für Neubauten und Nachrüstungen mit dem Ziel, die Energieeffizienz von Gebäuden bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% zu steigern. Ab 2022 müssen neue Gebäude außerdem über ihre Klimaauswirkungen berichten (Think Wood 2021).

Darüber hinaus gibt es freiwillige Zertifizierungssysteme für grünes Bauen, wie das in den USA weit verbreitete LEED-Programm (Leadership in Energy and Environmental Design) und den International Green Construction Code (IgCC). Nach Amiri et al. (2020) lassen jedoch auch diese Systeme das Potenzial zur Kohlenstoff-Entfernung außer Acht und konzentrieren sich stattdessen auf die Minimierung der Lebenszyklus-Emissionen.

Es gibt auch wichtige Standards für ein nachhaltiges Waldmanagement (und die Abholzung) z.B. das Program for Endorsement of Forest Certification (PEFC) und der Forest Stewardship Council (FSC).

Ähnlich wie bei der Biochar besteht eine entscheidende Herausforderung für die verstärkte Verwendung von Holz im Bauwesen darin, dass es keine Normen für seine Herstellung gibt. Da es unterschiedliche, nicht genormte Produkte gibt, müssen Ingenieure und Architekten mit den Parametern des jeweiligen Anbieters kalkulieren, was die Massenverwendung dieser Ressource erschwert, insbesondere für

strukturelle Komponenten.²⁹ Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die meisten Bauvorschriften verabschiedet wurden, bevor die heutigen Hightech-Holzbauprodukte entwickelt wurden, und daher aktualisiert werden müssen. Himes und Busby (2020) veröffentlichten eine theoretische Diskussion über politische Hindernisse für den Einsatz von Holz im Bauwesen sowie über vorgeschlagene politische Unterstützungsoptionen und die Mobilisierung von Privatkapital.

2.3.8 Bilanzierung

Nationale Treibhausgasinventarisierung

In nationalen THG-Inventaren wird die Verwendung von Holz im Bauwesen in der Kategorie *Harvested Wood Products* (HWP) abgebildet,³⁰ wobei gemäss IPCC-Richtlinien Erhöhungen des Kohlenstoff-Subpools im Inventar ausgewiesen werden (2019) (Rüter et al. 2019). Für die Berichterstattung über HWP sind im Rahmen des Pariser Abkommens verschiedene Methoden zulässig (Kayo et al. 2021). Die Schweiz verwendet den gleichen Ansatz wie in der Verpflichtungsperiode zwei des Kyoto-Protokolls, der auf den IPCC-Richtlinien von 2013 basiert (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014). Er wird als Produktionsansatz bezeichnet, da er Produkte zählt, die aus Holz aus dem Berichtsland hergestellt werden. In diesen Leitlinien wird also nicht der tatsächliche Kohlenstoffbestand im Berichtsland geschätzt, sondern der Bestand an Produkten, die aus im Inland geerntetem Holz hergestellt wurden. Ein Anstieg der HWP ist also ein Nettoanstieg des *Bestands* an geernteten Holzprodukten (und nicht eine Metrik des Flusses), und die Zu- und Abflüsse in diesen Bauholzbestand müssen überwacht werden. Er kann sich erhöhen, wenn auf nationaler Ebene mehr Holz in Wäldern oder Plantagen geerntet und verarbeitet wird (1), wenn sich die durchschnittliche Lebensdauer von HWP erhöht (2) oder wenn das Ausgangsmaterial von einem Produkt mit kürzerer Lebensdauer zu einem Produkt mit längerer Lebensdauer umgeschichtet wird (3).

(1) Eine erhöhte Holznutzung in Wäldern kann grundsätzlich etwas Gutes sein (Climate Smart Forestry) (Petersson et al. 2022), birgt aber auch Gefahren, wie oben bei den Risiken geschildert. Damit mehr geerntete Holzprodukte insgesamt zu einer CO₂-Entfernung führen, muss mehr Holzentnahme mit wachstumsfördernden Praktiken einhergehen, wie z. B. Walddüngung, Verwendung von verbessertem Pflanzenmaterial, Durchforstung und anderen Bewirtschaftungsstrategien, wie dem oben erwähnten Climate Smart Forestry (Petersson et al. 2022): Der HWP-Kohlenstoffpool und der Kohlenstoffpool der lebenden Biomasse im Wald sind miteinander verknüpft, da die Nettokohlenstoff Bilanz des Holzes durch die Summe der Kohlenstoffbestandsänderungen in den Wald- und HWP-Pools bestimmt wird.

(2) Die zweite Strategie - Verlängerung der Lebensdauer von HWP - durch Recycling oder Wiederverwendung von Biomassematerialien führt unmittelbar zur CO₂-Entfernung. Hier ist die Frage, ob die Standardwerte des IPCC für die Lebensdauer von HWP eine Abbildung solcher Änderungen erlauben.

(3) Die dritte Strategie (Umschichtung von Rohstoffen in langlebigere Produkte) verlängert die Lebensdauer des Kohlenstoffbestands, doch kann die wirtschaftliche Aufnahmefähigkeit solcher alternativen Produkttypen begrenzt sein. Das vielleicht extremste Beispiel für eine solche Veränderung ist der Wechsel von der energetischen Nutzung von Biomasse zur Verwendung von Holz im Bauwesen.

Bilanzierung auf den internationalen Kohlenstoffmärkten

Die Kohlenstoffmärkte haben bisher davon abgesehen, sektorale Bestandsveränderungen anzurechnen, so dass die CO₂ Entfernung durch HWP bisher weder auf den Freiwilligen, wie den verpflichtenden Märkten als solche anerkannt wurde. Bislang gibt es auch keine anerkannten Methoden für die emissionsmindernde Wirkung der Nutzung von HWP zur Verdrängung emissionsintensiverer Alternativen. Um solche Projekttypen in die Kohlenstoffmärkte einzubeziehen, müssten Baseline- und Monitoring-, Reporting- und Verifizierungsmethoden (MRV) entwickelt und in einem

²⁹ <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/they-can-capture-more-carbon-they-emit-so-why-arent-wooden-buildings-mainstream>

³⁰ Ein Produkt aus geerntetem Holz ist jede Art von Produkt, das aus geerntetem Holz hergestellt wird, z. B. Schnittholz, Holzwerkstoffe, Papier und Pappe (siehe Kayo et al. 2021).

Kohlenstoffmarktstandard überführt werden. Es scheint jedoch unwahrscheinlich, dass eine sektorale Anrechnung oder eine Anrechnung von Maßnahmen auf internationalen Kohlenstoffmärkten im Rahmen des Pariser Abkommens in absehbarer Zeit möglich sein wird.

Zukünftig könnten die Emissionsminderungen, die sich aus der Verwendung von Holz im Vergleich zu Stahl oder Beton ergeben für einzelnen Projekte in den freiwilligen Kohlenstoffmärkten angerechnet werden: Der Verified Carbon Standard (VCS) entwickelt derzeit eine Methode, mit der die Emissionsminderungen berechnet werden können, die sich aus der Verwendung von mehr Holz im Bau ergeben (im Vergleich zu anderen Bauarten, bei denen größere Mengen an emissionsintensivem Stahl und Beton verwendet werden). Es gibt jedoch auch zahlreiche Herausforderungen für die Anrechnung von TCCS auf den Kohlenstoffmärkten. Denn der Nachweis der Zusätzlichkeit, der Permanenz, des Fehlens von indirekten Emissionen (so genannte "Leckagen") und der transparenten Überwachung ist sehr anspruchsvoll.

Der Fokus liegt derzeit auf digitalen Lösungen, durch die die oben genannten Anforderungen kostengünstig erfüllt werden können. Es braucht vor allem auch Anwendungen, die das entsprechende konventionelle Gebäude mit einem Holzbau vergleicht, um die zusätzlichen Kosten zu berechnen.

Erkenntnisse aus der Ökobilanz (LCA) für das Accounting

Die Bedingungen für die Überwachung, Berichterstattung und Verifizierungsmethoden und auch die zur Verfügung stehenden Methoden entwickeln sich weiter. Es gibt aber noch keinen Konsens darüber, wie die Kohlenstoffspeicherung in Holzkonstruktionen (Timber Construction Carbon Storage, TCCS) auf Projektebene berücksichtigt werden soll. Auf nationaler Ebene werden die Bilanzierung innerhalb der HWP-Teilpools zudem nicht einheitlich gehandhabt. Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung und breitere Debatten über die notwendigen Bedingungen für die Anrechnung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten können daher bei der Entwicklung von Methoden helfen. Zu den Erwartungen, die sich aus den internationalen Diskussionen über die CO₂-Entfernung ergeben, gehören insbesondere die folgenden vier Punkte (Tanzer und Ramírez 2019):

- 1) Treibhausgase werden aus der Atmosphäre entfernt und gespeichert.
- 2) Die Treibhausgase werden dauerhaft gespeichert, es besteht aber keine Einigkeit darüber, ob eine zeitlich begrenzte Dauer akzeptabel ist (z. B. 30 oder 100 Jahre).
- 3) Alle in der Wertschöpfungskette anfallenden Emissionen werden von dem gespeicherten Kohlenstoff abgezogen.
- 4) Die Gesamtmenge des gespeicherten CO₂ muss die Emissionen übersteigen

Die Studie von Tanzer und Ramirez (2019) gilt als wichtige Grundlage für die Entwicklung entsprechender Methoden in der EU.

Im Gegensatz zu dem Fall, dass einzelne Projekte bilanziert werden sollen - was eine Cradle-to-Grave-Perspektive erfordert - kann für die Verfolgung einer Akkumulation von Holzprodukten ein Cradle-to-Gate-Ansatz gewählt werden. Dabei werden die Emissionen aus der Holzernte, dem Transport, der Verarbeitung und dem Bau ermittelt und von dem in den Produkten enthaltenen Kohlenstoff abgezogen. Der CO₂ -Gehalt im Holzbau ist nach Baumarten (Weich- oder Hartholz) standardisiert.

Mit einer solchen Systemgrenze, die auch die vorgelagerten Emissionen und die Rodung im Waldsektor einschließt, wird deutlich, dass eine erhöhte Holznutzung auch negative Auswirkungen auf die CO₂-Speicherung im Wald haben kann. Negative Auswirkungen sowohl auf den Kohlenstoffvorrat und das Kohlenstoffentnahmepotenzial der Wälder als auch auf andere Nachhaltigkeitsdimensionen müssen durch gezielte Überwachungs- und Sanierungsmaßnahmen bei der Waldbewirtschaftung (u. a. durch qualitative Kriterien und eine Risikobewertung) minimiert werden (Cooper and MacFarlane 2023). Die Risiken der Entwaldung dürften im globalen Süden besonders ausgeprägt sein, weniger dagegen in den Wirtschaftswäldern in Industrieländern, die strengen Waldgesetzen unterliegen. Eine weitere Möglichkeit, Entwaldungsrisiken zu identifizieren und zu managen, ist die Nutzung von Zertifizierungssystemen wie FSC oder PEFC.

Wenn es um die Bilanzierung einzelner Projekte geht (und nicht um einen Teilssektor-Kohlenstoffpool), muss gemäss der Definition von CO₂-Entfernung und aufgrund der LCA-Perspektive die dauerhafte Speicherung von CO₂ überwacht sein - was bedeutet, dass eine noch größere Systemgrenze angewendet werden muss: Cradle-to-Grave. Solange die Nachnutzung nicht überwacht und bilanziert wird, ist die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung nicht gesichert, was bedeutet, dass keine CO₂-Entfernung stattgefunden hat. Auf internationaler Ebene werden derzeit Anstrengungen unternommen, um eine allfällige CO₂-Entfernung durch Holzbau bilanzierbar zu machen. Die begleitende Forschung untersucht die Gültigkeit bestehender Ansätze auf den freiwilligen Kohlenstoffmärkten sowie das Ausmaß, in dem die nationalen Leitlinien für die Bilanzierung von Treibhausgasinventaren für die künftige Anrechnung solcher Aktivitäten genutzt werden können.

2.3.9 Offene Fragen und Ausblick

Technologische

Es ist unklar, welche alternativen Ansätze für die Festlegung der Systemgrenzen für die gesteigerte Nutzung von Holzprodukten adäquat sind und wie sich die Systemgrenzen auf die Bewertung von solchen Aktivitäten in Bezug auf die CO₂-Entfernung auswirken.

Akteure, Politiken und Bilanzierung

Durch die nach dem Pariser Abkommen freie Wahl der Bilanzierungsregeln von HWP unter den NDCs muss geklärt werden, in welchen Fällen Lücken entstehen und in welchen Fällen eher Doppelzählungen erfolgen, wenn zwei Länder, die miteinander Holz handeln, unterschiedliche Methoden anwenden.

Wem gehören die erreichten Senkenleistungen der HWP, wenn Compliance Märkte wie Senkeschweiz und der freiwillige Markt nebeneinander existieren?

Wie kann eine Anrechnung der Substitutionseffekte erfolgen, ohne zu Doppelzählungen zu führen?

Wie können zeitgemässe Bilanzierungsregeln unter Einbezug der Implikationen neuer (Standard-)Entwicklungen bzgl. Minderungsprojekten auf Basis von Holzprodukten erstellt werden, welche sicherstellen, dass die Zunahme der Holznachfrage Ökosysteme nicht negativ beeinflusst?

Wie muss die Zusätzlichkeit definiert werden, insbesondere im Fall einer Anrechnung von (Sub-)Sektor weiten kumulativen Resultaten anstelle von Einzelprojekten. Dies erfordert weiterführende Analyse verschiedener Standards und deren Regelwerke und deren Interpretation in Bezug auf neuartige Aktivitätstypen.

2.4 CO₂ Abscheidung bei Biomasse Prozessen (BECCS)

2.4.1 Allgemeine Beschreibung

“Carbon Capture” (“**CC**” in der Abkürzung von CCS bzw. BECCS) bezieht sich auf verschiedene Verfahren, um CO₂ aus Abgasen, sogenannten Punktquellen, abzutrennen. Wenn das Substrat Biomasse ist, z.B. Holz, und diese energetisch genutzt wird, dann spricht man von «BioEnergy Carbon Capture» (wobei diese Anwendung üblicherweise mit der Speicherung des Kohlenstoffs beschrieben wird, also BECCS). Die eingesetzten Verfahren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Technologie, sondern sind auch von der Art der Punktquelle, z.B. dem Rohmaterial und der Verwendung des CO₂ abhängig. Nur beim Einsatz von nachhaltiger Biomasse können negative Emissionen erzielt werden, ansonsten können die Verfahren je nach Ausprägung maximal klima-neutral (“carbon neutral”) sein.

Als Punktquellen kommen Abgase aus Verbrennungen oder Kalzinierungen, Produktgase aus chemischen Reaktionen, Zementherstellung, Reformierung, Pyrolyse und Vergasungen sowie Gasgemische aus biologischen Prozessen (Vergärung, Fermentierung) in Frage. Für die Bewertung ist die Zusammensetzung des Ausgangsstoffs der Punktquelle wichtig. Bei biogenem Kohlenstoff aus Biomasse haben Pflanzen den Kohlenstoff vorher der Atmosphäre entzogen, während fossiler Kohlenstoff aus Kohle, Erdöl oder Erdgas stammt und geogener Kohlenstoff aus den Karbonatanteilen von Gesteinen freigesetzt wird, etwa bei der Zementherstellung.

Die eigentliche Abtrennung des CO₂ kann durch viele verschiedene Weisen erfolgen, z.B. durch Wäscher und Adsorber, die die Löslichkeit oder die Polarität des Moleküls nutzen, sowie Membranen und Kondensationen. Die Verfahren unterscheiden sich dementsprechend auch durch die eingesetzten Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur), die Kapitalkosten und die Energiebilanz (Strom, Wärme). Welches der Abtrennverfahren am besten geeignet ist, hängt von der potentiellen Integration mit vorhandenen Verfahrensschritten, insbesondere bei der Wärmeintegration und -rückgewinnung ab und kann von Standort und Anlagengröße variieren, was somit auch die Vielzahl von etablierten Verfahren erklärt.

Für die Speicherung bzw. Verwendung des abgetrennten Kohlendioxids werden folgende Fälle unterschieden: 1) Methoden, die den Kohlenstoff für lange Zeit fixieren, etwa in Aquiferen, Gesteinen oder ehemaligen Öl- und Gas-Lagerstätten, Karbonatisierung von Betongranulat; 2) Nutzungen für Produkte, die relativ bald wieder verbraucht werden, z.B. Energieträger, Chemikalien, Nutzgegenstände. Im ersten Fall spricht man dann von «Sequestration» oder «Storage» (**S**), im zweiten Fall von «Use» (**U**). Damit ergeben sich insgesamt vier Kombinationen und die entsprechenden Abkürzungen, von denen nur die Sequestrierung biogenen Kohlenstoffs für negative Emissionen in Frage kommen (**BECCS**). Die (Um-) Nutzung fossilen oder geogenen Kohlenstoffs als Ersatz für fossile Brennstoffe in z.B. schwer dekarbonisierbaren Anwendungen, erhöht die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (**CCU**) und kann maximal als Übergangslösung gesehen werden. Ebenso ist **CCS** maximal klimaneutral, da immer Emissionen, Energieverbräuche, Hilfsmittel und Umweltauswirkungen der Abtrenn- bzw. Umwandlungsverfahren sowie der CO₂-Logistik zusätzlich berücksichtigt werden müssen. Langfristig wird **BECCU** genutzt werden müssen, um alles herzustellen, was derzeit aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird. Das CO₂ lässt sich beispielsweise in Power-to-X Verfahren mit Wasserstoff direkt zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen einsetzen, die als Energieträger (Methan, Methanol, Benzin, Diesel, Kerosin) oder Chemikalienvorprodukte (vor allem Methanol sowie weitere Alkohole und Ether) dienen und so fossile Produkte ersetzen können.

Ursprung Kohlenstoff Nutzung Kohlenstoff	fossil, geogen (Kohle, Erdöl, Erdgas, Gesteine)	biogen (Biomasse)
Sequestrierung, z.B.. Fixierung in Gesteinen, Lagerstätten, dauerhaften Bauteilen	CCS Deutliche Senkung der Emissionen	BECCS Negative Emissionen, damit Verminderung der Klimagase
Nutzung für Energieträger, Chemikalien, Nutzgegenstände	CCU Geringe Senkung der Emissionen	BECCU Deutliche Senkung der Emissionen, langfristig klimaneutral

2.4.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme sowie die wichtigsten Treiber

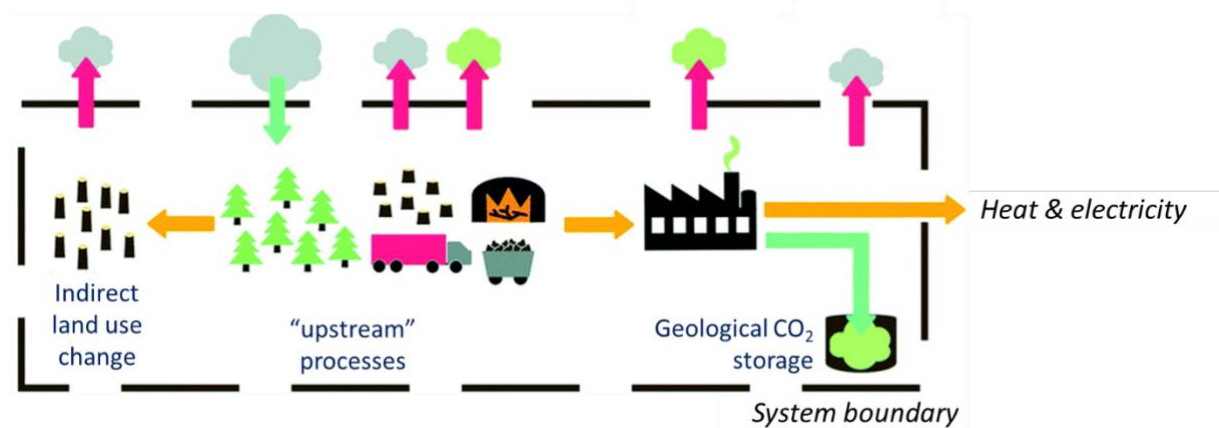


Abbildung 17: Systemgrenzen eines BECCS-Systems für die Wärme- und Stromerzeugung.

Folgende Prozesse und damit verbundene Kohlenstoffflüsse müssen bei der Bilanzierung der Klimaauswirkungen berücksichtigt werden: Die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre während des Biomassewachstums; Emissionen aus der Ernte; CO₂-Emissionen, die nicht an der Punktquelle erfasst werden; dauerhaft in geologischen Lagern gespeichertes CO₂; THG-Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen.

Da der Begriff "(Bioenergie mit) Kohlenstoffabscheidung und -speicherung" ((BE)CCS) zahlreiche Technologieoptionen umfasst, können die Systemgrenzen für die Bilanzierung der Klimawirkungen und anderer Umweltbelastungen kaum für alle diese Optionen passend formuliert werden (Fajardy und Dowell 2017; Kemper 2015; Withey et al. 2019). In der allgemeinsten Form umfassen BECCS und Carbon Dioxide Removal (CDR) als Dienstleistung die folgenden Prozesse: a) Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre durch das Wachstum von Biomasse und die gesamte Biomasse-Lieferkette (Wachstum, Ernte, Transport) b) Umwandlung von Biomasse in Produkte, die als Energieträger oder sekundäre biogene Rohstoffe genutzt werden, c) CO₂ Abscheidung, d) CO₂ Transport und e) schließlich die dauerhafte CO₂ Speicherung.

Bei BECCS-Systemen handelt es sich in der Regel um Systeme mit mehreren Outputs, bei denen der Hauptzweck der Biomasseumwandlung das Haupt- oder Referenzprodukt und damit potenziell auch die funktionelle Einheit bestimmt. CDR als Dienstleistung ist einer der nützlichen Outputs dieser BECCS-Systeme und daher mit einem positiven Marktpreis verbunden (d. h. ein "nützliches Produkt"), andere Outputs können Energie und Wärme sein. Was die Anrechnung von negativen Auswirkungen betrifft, so gibt es mehrere Möglichkeiten, mit der Multifunktionalität umzugehen: Erstens können die Umweltbelastungen dieser Biomasseumwandlungsprozesse einschließlich aller vorherigen Prozesse in der Prozesskette (z. B. Biomasseproduktion und -bereitstellung) aufgeteilt und teilweise allen nützlichen (wertvollen) Outputs zugeordnet werden. Wenn CDR (z. B. die dauerhafte Entfernung einer Einheit CO₂) die funktionale Einheit darstellt, können anderen Produkten, die vom BECCS-System bereitgestellt werden, z. B. Wärme und Strom, die von einer Biomassefeuerungsanlage mit CCS erzeugt werden, Umweltbelastungen zugewiesen werden, die ihren relativen Erträgen entsprechen, und zwar proportional zu den Produktionsmengen und Marktpreisen (als "Allokation" bezeichnet). Zweitens kann davon ausgegangen werden, dass diese von der BECCS-Anlage erzeugten Produkte die konventionelle Produktion - in diesem Fall von Energie oder Rohstoffen - ersetzen. Für diese können Reduktionsgutschriften in Anspruch genommen werden, entsprechend der vermiedenen Produktion in einem System ohne BECCS-System.

Die Art der genutzten Biomasseressourcen bzw. -rohstoffen ist von entscheidender Bedeutung für die Quantifizierung von Klimaauswirkungen und Umweltbelastungen: Während die Nutzung von Rest- oder Abfallbiomasse in einer solchen Bilanzierung als frei von Umweltbelastungen angesehen werden kann

(Antonini et al. 2020, 2021) führt die Nutzung von Sonderkulturen oder Biomasseplantagen häufig zu direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, die mit Klimaauswirkungen verbunden sind und von den lokalen Randbedingungen abhängen (Calvin et al. 2021; Creutzig et al. 2015).

Bei der Biomassekonversion mit Kohlenstoffabscheidung wird die Wirksamkeit von CDR vom Kohlenstoffanteil, der bei der Biomassekonversion abgeschieden und dauerhaft gespeichert (aus der Atmosphäre entfernt) wird, sowie indirekte Klimaauswirkungen oder andere THG-Emissionen innerhalb des Prozesses beeinflusst. Im Schweizer Kontext scheinen die folgenden BECCS-Systeme für CDR am relevantesten zu sein: Holzverbrennung, Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Zementwerke, die biogene Reststoffe zur Energieversorgung nutzen. Wichtig ist, dass nur die biogenen Abfall- oder Energieträgerfraktionen, die in KVA- und Zementanlagen verwendet werden, CDR liefern können, während die Abscheidung und Speicherung von CO₂ aus fossilen Ressourcen das CO₂ nicht innerhalb relevanter Zeiträume aus der Atmosphäre entfernt. Daher sind diese biogenen Anteile des Kohlenstoffs sowie die CO₂ Abscheidungsraten wichtig für die Bilanzierung der Klimaauswirkungen und die Menge des erzeugten CDR.

Zusätzlich zur CDR erzeugen Holzverbrennungs-, KVA- und ARA-Anlagen mit CCS neben der CDR-Dienstleistung auch Wärme und Strom als Nebenprodukte; Zementwerke mit CCS produzieren Zement. Die Behandlung dieser Multifunktionalität unter Anwendung eines Substitutionsansatzes scheint der konsequenteste Ansatz für die Berücksichtigung der Wirksamkeit der Kohlenstoffabscheidung, der Klimaauswirkungen und anderer Umweltbelastungen zu sein, der einen Vergleich der Wirksamkeit der Kohlenstoffabscheidung und der gesamten Umweltleistung von BECCS-Systemen ermöglicht. Ein solcher Ansatz würde auf der Annahme beruhen, dass Wärme, Elektrizität und Zement die Grenzproduktion von Wärme, Elektrizität und Zement ersetzen würden, d. h. den Produzenten mit den höchsten Produktionskosten. Diese vermiedene Produktion würde mit Emissionsreduktionsgutschriften angerechnet, die den Emissionen der ersetzten Produktion entsprechen. Wenn nicht mehr Holz genutzt wird, als dem natürlichen Wachstum der Wälder entspricht, kann die Holzernte als nachhaltige Forstwirtschaft ohne indirekte Landnutzungsänderungen angesehen werden.

Der Vergleich und die Bewertung der Gesamtauswirkungen und der optimalen Nutzung dieser Prozesse kann nur auf Basis von Szenarien erfolgen, da eine Änderung eines Prozesses den gesamten Output und die Umweltbelastung aller anderen Prozesse beeinflussen kann. Eine solche systemweite Analyse wird in der verbleibenden Projektlaufzeit durchgeführt werden.

2.4.3 Co-Benefits

Klimarelevante Vorteile

- Die Nutzung von Synergien mit anderen Anlagen spart Kosten und Energie und dadurch Treibhausgase. Es können grössere Mengen CO₂ an einem Standort abgetrennt und dann allenfalls weiterverarbeitet oder für den Weitertransport vorbereitet werden. Wegen der möglichen (Wärme-) Integration mit bestehenden Anlagen und den viel höheren CO₂ Konzentrationen ist der Energieeinsatz und die Kosten hier viel tiefer als bei Abtrennung von CO₂ aus der Atmosphäre (Punktquellen 10-50% CO₂-Anteile, Atmosphäre 0.04%)
- Insbesondere bei Punktquellen mit einem Anteil biogener Emissionen ist es möglich, PtX-Verfahren zeitlich mit Negativemissionen abzuwechseln, d.h. bei Verfügbarkeit von günstigem erneuerbarem Wasserstoff wird ein erneuerbarer Kohlenwasserstoff hergestellt, während zu anderen Zeiten das abgetrennte CO₂ für die Sequestrierung bereitsteht. Durch diesen doppelten systemischen Nutzen (Flexible Energiespeicherung, Negativemissionen) entsteht durch die bessere Auslastung der Anlagen auch noch ein ökonomischer Vorteil.

Weitere nicht Klima-Relevanten Vorteile

- Bei der CO₂-Abtrennung aus Rauchgasen können auch weitere Schadstoffe (Staub, Stickoxide, Schwefeloxide etc.) abgetrennt werden. Dies hätte bessere Luftqualität und weniger Umweltbeeinträchtigung zur Folge.
- Die Anwendung von Carbon Capture aus unvermeidbaren Quellen ermöglicht die Nutzung von diesem Kohlenstoff als Rohstoff für die Industrie, die dadurch flexibler und unabhängiger von Kohlenstoffimporten wird.

2.4.4 Risiken

Klimarelevante Risiken

Die folgenden Risiken, die eine direkte Auswirkung aufs Klima haben, konnten identifiziert werden:

- Umweltbelastung durch chemische Hilfsmittel (z.B. Amine) sowie der Verlust von Treibhausgasen in die Atmosphäre (z.B. Methanschlupf)
- Bei unklaren Zuordnungen der negativen Emissionen kann es zu Greenwashing kommen. Transparenz und Kontrolle ist nötig, um Doppelabrechnungen zu vermeiden.
- Die Verpressung von CO₂ in Öllagerstätten, um deren Ausbeute zu erhöhen («enhanced Oil recovery») kann zur Förderung von mehr fossilen Produkten führen und allenfalls deren Preis tief halten, so dass insgesamt mehr fossile Stoffe gebraucht werden.
- Der hohe Energiebedarf von Carbon Capture kann zu Preiserhöhungen der Energie führen. Es ist möglich, dass benutzte Energie dann an anderer wichtiger Stelle fehlt, insgesamt die System-Effizienz abnimmt und Versorgungslücken bezüglich thermischer und elektrischer Energie entstehen.
- Durch politische Förderung von bestimmten Technologien, z.B. erzwungene Abtrennung nur in bestimmten Verfahren, kann es zu Verzerrungen kommen, und die effizienteste oder die aus der Gesamtsystem-Perspektive beste Lösung verhindert werden.

Nicht-klimarelevante Risiken

- Je nach Verfahren sind die Einstufungen von Betriebsbewilligung und Versicherung unklar.

2.4.5 Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber

Die Kosten von Carbon Capture aus verschiedenen Industrieprozessen wurden in einer Studie der IEA (International Energy Agency 2022) untersucht und sind in Abbildung 18 dargestellt. Wie zu erwarten, sind die Abtrennkosten für CO₂ umso höher, je tiefer die CO₂-Konzentration ist. Dementsprechend ist Direct Air Capture am teuersten (0.04% CO₂ in der Luft), gefolgt von Rauchgasen wegen deren hohen Anteil von Stickstoff und Restsauerstoff und den Abgasen der Zementherstellung. Prozesse, bei denen CO₂ als ein Haupt-Koppelprodukt entsteht, z.B. Vergasung oder Vergärung haben daher die tiefsten CO₂-Bereitstellungskosten. Typische CO₂-Gehalte von Gasen aus industriellen Verfahren, die in der Schweiz zur Anwendung kommen, sind in Tabelle 3 aufgeführt. Weitere Komponenten wie Sauerstoff oder Methan-Gehalt haben einen Einfluss darauf, welche Abtrenntechnologien eingesetzt werden können.

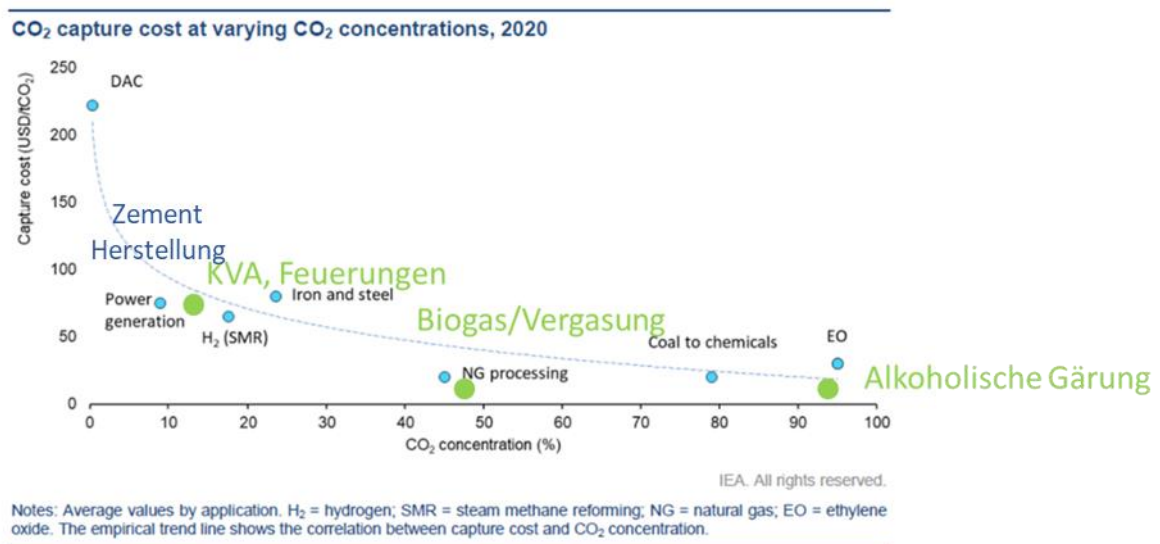


Abbildung 18: Kosten von Carbon Capture aus verschiedenen Industrieprozessen (International Energy Agency 2022, p. 27). Biomasse-basierte Prozesse wurden von den Autoren ergänzt.

Tabelle 3: Typische (CO₂-) Gehalte von Gasen aus industriellen Verfahren, die in der Schweiz zur Anwendung kommen

CO ₂ Quellen	Zementwerk	KVA/Feuerungen	Biogas/ARA	Vergasung Synthese
Gehalt CO ₂	>15%	<12%	37-50%	30-50%
Gehalt O ₂	>10%	>9%	< 1%	0%
Methangehalt	0%	0%	62-50%	0-45%

Verfahren zur Abtrennung von CO₂

Tabelle 4 listet Verfahren zur Abtrennung von CO₂ aus industriellen Gasgemischen, wobei zwischen verschiedenen Wirkmechanismen unterschieden wird. Ausserdem werden Beispiele für diese Verfahren in der Schweiz benannt. Sehr weit verbreitet sind Wäscher, bei denen CO₂-haltiges Gas mit Waschmitteln in Kontakt gebracht wird, meist im Gegenstrom (siehe Abbildung 19). Als Wirkmechanismus kommt physikalische Adsorption in Frage, bei der das CO₂ wegen höherer relativer Löslichkeit gebunden ist, oder chemische Wäscher. Bei diesen entsteht eine reversible chemische Bindung. Eine chemische Bindung hat den Vorteil der höheren Selektivität und Kapazität des Waschmittels, erfordert aber einen höheren Energieaufwand (meist höhere Temperaturen >160°C) bei der Regeneration des Waschmittels.

Tabelle 4: Verfahren zur Abtrennung von CO₂ aus Gasmischungen

Absorption (in Flüssigkeiten)	Membranen	Adsorption (auf Feststoffen)	Kryogen
Physikalisch: - Druckwasserwäsche an Biogasanlagen - Rectisol (MeOH, Kohlevergasung)	Polymer-Membranen, z.B. ARAs Brugg, Turgi, Wildegg	Physikalisch: Druckwechsel-adsorption (PSA)	Verflüssigung CO ₂ (z.B. bei Biogasanlage Bachenbülach)
Chemisch organisch: Aminwäsche (z.B. Biogasanlage SFPI, ARA Werdhölzli, Norcem Breivik)		Chemisch: Druck-/ Temp.-Wechsel-Adsorption; Kalzit/Karbonat (z.B. Sorption enhanced gasification)	
Chemisch anorganisch: - Kali-Lauge (KOH) - Pottasche-Lauge (K₂CO₃/KHCO₃) - Chilled Ammonia (z.B. Zementfabrik in Norwegen)			

Ähnlich verhält es sich bei der Adsorption von CO₂ auf Feststoffen. Bei der weit verbreiteten Druckwechseladsorption (engl. pressure swing adsorption, PSA) adsorbiert das CO₂ präferentiell bei erhöhten Drücken auf einem geeigneten Sorbent (z.B. Molekularsiebe). Da es sich um einen physikalischen Effekt handelt, reicht die Verringerung des Drucks zur Regeneration des Sorbents. Da es sich, anders als bei den kontinuierlichen Wäschern, um einen instationären Vorgang handelt, werden

in der Realität meist vier Kessel eingesetzt, die sich in den unterschiedlichen Phasen der Adsorption und Regeneration befinden, um die stetige CO₂-Abtrennung zu erreichen.

Während kryogene Trennverfahren auf den unterschiedlichen Siedepunkten der Gase beruhen, nutzen Polymer-Membranen (z.B. Poly-Amide) für die Biogasaufbereitung die im Vergleich zu Methan oder Stickstoff leichtere Permeation von CO₂. Deshalb reichen meist Druckunterschied zwischen 10 und 20 bar aus, um Biogas aufzubereiten, allerdings in Verschaltung von zwei oder drei Stufen. Wegen der noch höheren Permeation von Wasserstoff sind diese Membranen jedoch nicht geeignet, um wasserstoff-freies CO₂ aus Synthesegasen abzutrennen.

Wäscher werden vor allem bei grösseren Anlagen eingesetzt, da sie in kleinem Massstab vergleichsweise teuer sind und bei der Hochskalierung deutlich günstiger werden. Bei kleinen Anlagen, insbesondere Biogasanlagen werden eher Druckwechseladsorptionen, Membranen und neuerdings auch die kryogene Trennung eingesetzt. Die Auswahl des CO₂-Abtrennverfahrens muss für jeden Standort individuell getroffen werden, da die Kostenunterschiede der Verfahren je nach Situation kleiner sein können als Synergien bei der (Energie-)Integration mit bestehenden Verfahren oder bestehender Infrastruktur.

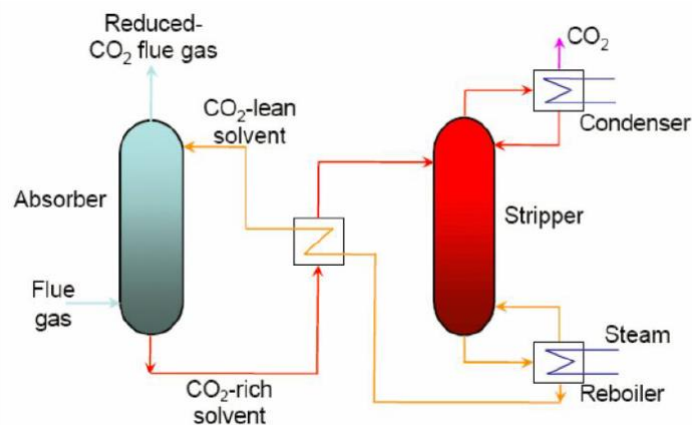


Abbildung 19: Prinzip-Skizze eines CO₂-Wäschers (z.B. Aminwäsche)

Potential für die Punktquellen in der Schweiz

Eine Studie von Empa und PSI (Teske et al. 2019) hat vor einiger Zeit das Potential für Power-to-Gas in der Schweiz ermittelt und dabei auch die CO₂ Punktquellen dargestellt (siehe Abbildung 20), wobei der Fokus auf Zementwerken, Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und Kläranlagen (ARA) lag. Die sechs Zementwerke stellen jeweils die grössten Punktquellen dar, aber insgesamt stossen alle KVAs zusammen mehr CO₂ aus als alle Zementwerke, weshalb die KVAs für die Dekarbonisierung besonders relevant sind. Das CO₂ bei ARAs ist zu fast 100% biogenen Ursprungs und eignet sich daher für Negativemissionen, hat aber nur einen sehr kleinen Anteil am Gesamtausstoss und es existieren mehr als 500 solcher Anlagen, was die Ausschöpfung des Potentials sehr aufwändig machen würde. Dagegen beträgt der biogene Anteil bei KVAs etwa 50%³¹ (und bei den Zementwerken knapp 10% (Nakhle et al. 2022, Abbildung 5). Das grösste Potential für biogenes CO₂ und damit negative Emissionen befindet sich daher bei den KVAs.

Da bei allen Punktquellen das Potential besteht, im Rahmen von CCU, z.B. bei PtX-Anwendungen, das CO₂ zu anderen Produkten umzusetzen, besteht eine gewisse Konkurrenz zu CCS bzw. Negativemissionen. Da vermutlich der Strom in Zukunft zu gewissen Zeiten (Winter) knapp und teuer

³¹[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/VBSA-CO2-Report_2023_Def.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/VBSA-CO2-Report_2023_Def.pdf.download.pdf/VBSA-CO2-Report_2023_Def.pdf)

sein wird, wird es vermutlich zu einer gewisse saisonale Flexibilität kommen (Moioli and Schildhauer 2022), so dass CO₂ bei tiefen Strompreisen für die energieintensiven PtX-Anwendungen genutzt wird und sonst für CCS bzw. im Fall von biogenem CO₂ für Negativemissionen. Wenn das Eintrifft, dann sinkt das (BE)CCS-Potential an einer solchen Punktquelle deutlich. Falls bei der Nutzung der Produkte aus dem PtX das CO₂ aufgefangen wird, erhöht sich das Potential wieder.

Für die Schweizer Zementindustrie als grösste Emittentin wurden in einer ETH-Studie (Nakhle et al. 2022) detailliert die verschiedenen Hebel, Potentiale und Kosten aufgeführt: Diese sind insbesondere alternative und biogene Brennstoffe als Substitution für fossile Brennstoffe in der Klinkerproduktion. Je höher der Anteil biogener Brennstoffe im Zementwerk ist, desto mehr BECCS lässt sich betreiben. Der Anteil ist jedoch auf maximal 30% beschränkt, da der restliche Teil als geogene Emissionen aus der Kalzinierung stammt. Daneben ist insbesondere die Klinkersubstitution im Zement von Bedeutung, die seit über 30 Jahren vorangetrieben wird und bereits signifikante Verminderungen der CO₂-Emissionen pro Tonne Zement erlaubte, siehe Abbildung 21.

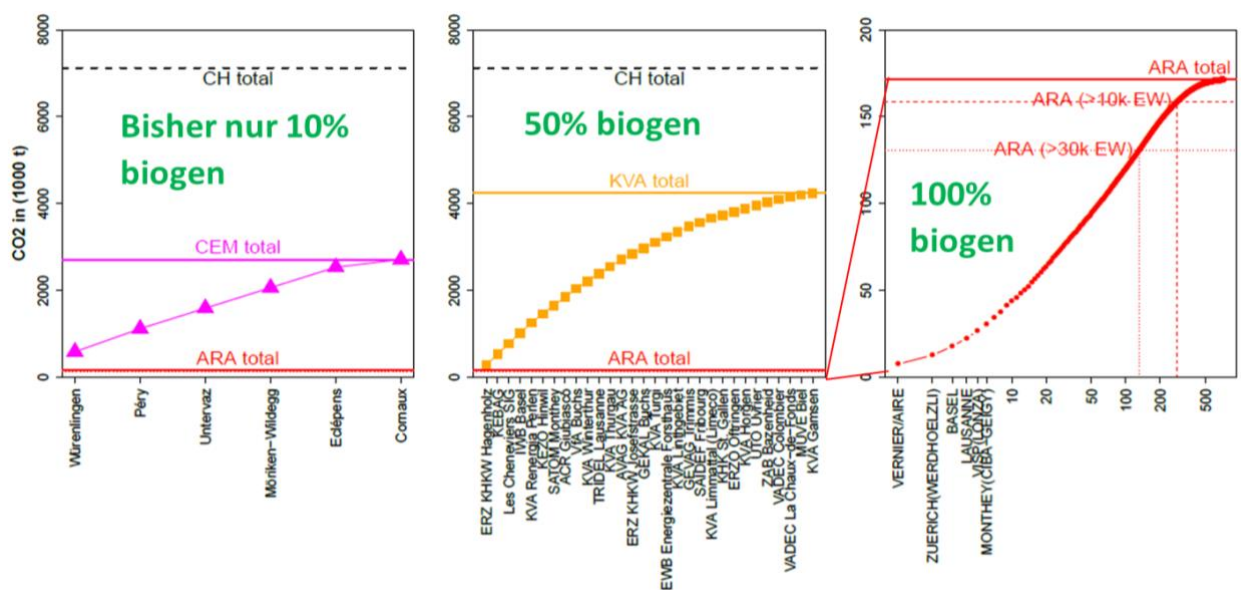


Abbildung 20: CO₂ Punktquellen in der Schweiz: Zementwerke (CEM), Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) und Kläranlagen (ARA); kumulierte Darstellung des jährlichen CO₂-Ausstosses, jeweils sortiert nach abnehmendem Beitrag der Anlagen (Teske et al. 2019).

Anmerkung: In der Grafik links sieht man die CEM Emissionen der einzelnen Werke (pinke Dreiecke und den kumulierten Wert (pinke Linie) zum Vergleich wird unten die ARA kumulierte rote Linie gezeigt. In der Mitte sieht man alle einzelnen KVA also kleine Quadrate und die kumulierte Menge als gelbe Linie. Im Vergleich wieder ARA. In der rechten Grafik sind nur die Emissionen aus ARA gezeigt. Man sieht an den ersten beiden Grafiken, dass ARA im Vergleich zu den anderen Emissionen sehr klein ist.

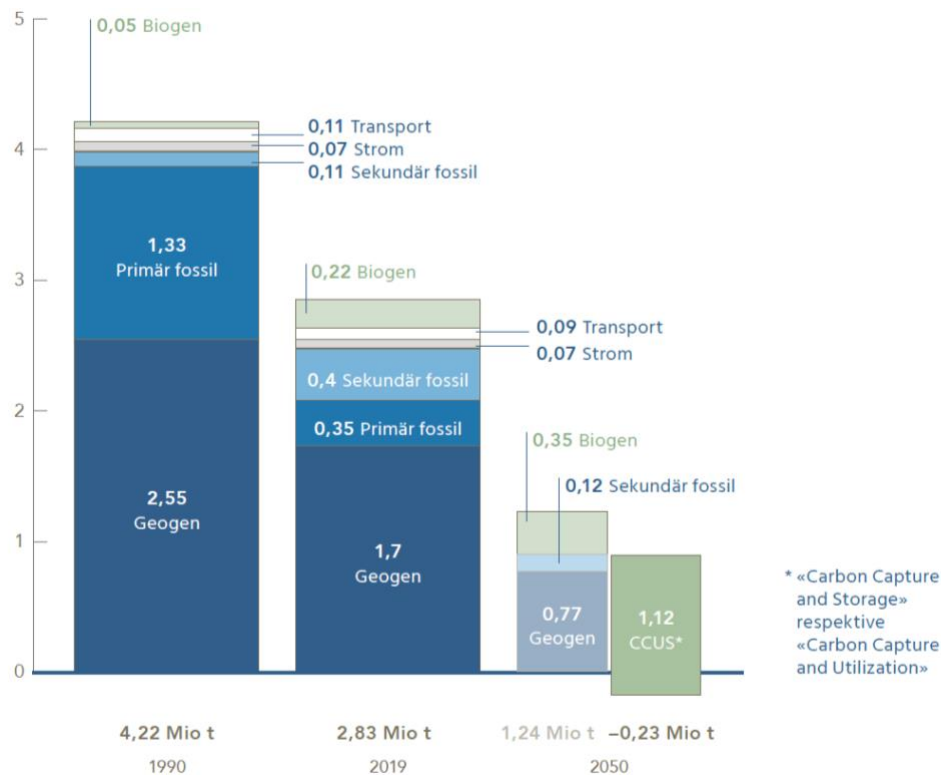


Abbildung 21: Emissionen aus der Zementindustrie in 1990, 2019 und 2050 (Cemsuisse 2021)

Anmerkung: Man sieht, dass schon jetzt ca. 1/3 der fossilen Brennstoffe eingespart werden konnten. Bis 2050 sind weitere Einsparungen geplant.

2.4.6 Relevante Akteure und Projekte

Die Mehrheit der Schweizer NET Akteure beschäftigt sich mit (BE)CC, sowohl CO₂ Emittenten, Anbieter von Speicherlösungen und auch Dienstleister oder Regulatoren, wie unsere Umfrage unter NET Akteuren gezeigt hat (Dittli 2023). Die folgenden Akteure sind besonders wichtig für BECC:

Regulator

BAFU und BFE: Diese beiden Bundesämter spielen eine koordinierende Rolle und entscheiden über Projektfinanzierungen. Sie werden in der Umfrage am häufigsten genannt. Das BFE muss die Energiesicherheit sicherstellen, da die Abscheidung von CO₂ aus stromerzeugenden Punktquellen einen Einfluss auf die Stromproduktion hat und ist deshalb sehr stark in verschiedene Projekte involviert.

Emittenten

An dritter Stelle werden die KVAs genannt, die eine sehr wichtige Rolle spielen, da hier sowohl biogene als auch fossile Abfälle verbrannt werden. In der Schweiz werden derzeit verschiedene Projekte zur Minderung der Emissionen vorangetrieben. Beispielsweise von der KVA Linth, die zusammen mit der ETH und dem [VBSA](https://vbsa.ch/)³² ein [Pilotprojekt durchführt](https://www.kva-linth.ch/energie-umwelt#section-id-100)³³, da im Rahmen einer Gesamterneuerung im Jahr 2025 die beiden Öfen ersetzt werden müssen.

Auch häufig genannt werden die grossen Zementwerke, wie z.B. Holcim, Jura Cem und Vigier, da in der Zementproduktion auch Biomassen genutzt werden. Die Werke werden nach Aussen meist von dem Verband [Cemsuisse](https://www.cemsuisse.ch/)³⁴ vertreten, einer der DeCIRRA Implementierungspartner und aktiv involviert in der Dekarbonisierungsdebatte.

³² <https://vbsa.ch/>

³³ <https://www.kva-linth.ch/energie-umwelt#section-id-100>

³⁴ <https://www.cemsuisse.ch/>

Die Abwasserwerke (ARA) sind auch wichtige Emittenten und damit potenzielle Abscheidungsorte, wenn auch die Gesamtkohlenstoff-Menge geringer ist und es aufgrund der hohen Anzahl an Anlagen eher aufwendig werden würde, jede einzelne mit CCS auszustatten.

Weiterhin wird in der Schweiz in zahlreichen kleineren und grösseren Blockheizkraftwerken Holz zur Wärme und/ oder Stromerzeugung genutzt. Diese sind auch wichtige Akteure für potentielle Abscheidungen. Weitere Emittenten sind die chemische und andere Industrie, diese wurden in der Umfrage weniger genannt.

Andere private Akteure

Viele Anlagenbaufirmen bieten Abscheidungsanlagen an. Organisationen und Firmen, die Marktplätze betreiben oder NET Projekte entwickeln und finanzieren sind wichtig, um Projekte konkret umzusetzen und den Geldfluss sicher zu stellen. Dazu ist auch eine enge Zusammenarbeit mit der Finanzindustrie nötig. Airfix/ Southpole sind in Projekte involviert, erste Abscheidungen an KVAs zu planen.

Forschung

Forschungsinstitute, wie z.B. die ETHZ, EPFL und auch die ZHAW sind sehr aktiv und forschen z.B. an besseren Materialien zur CO₂ Abscheidung oder Akzeptanz solcher Massnahmen. Sie sind in verschiedenen Forschungsprojekten involviert, die sich mit BECC beschäftigen.

Die Empa und das PSI sind aktiv in der Untersuchung von neuen Materialien und Prozessen im Zusammenhang mit der Abscheidung von CO₂ und Nutzung zur Herstellung von Gasen zusammen mit Wasserstoff.

Verbände und Stiftungen

Schweizerische Klimastiftung: Die Schweizerische Klimastiftung unterstützt Projekte zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Förderung nachhaltiger Technologien.

Wie schon oben genannt, sind die beiden wichtigsten Verbände CemSuisse und der VBSA. Aber auch die [Holzenergie Schweiz](#)³⁵ muss zukünftig eine wichtige Rolle spielen, da Holz als Einsatz in Holzkraftwerken und in anderen Prozessen eine zentrale Rolle spielt.

Die [Stiftung Risiko Dialog](#)³⁶ betreibt einerseits die [Swiss Carbon Removal Platform](#)³⁷, informiert und vernetzt damit die Branche und organisiert immer wieder Events und Meetings.

2.4.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize

Für die Einschätzung von Politiken für BECC müssen je nach den Anwendungs-Kontexten, z.B. Zementwerke, Abfallverbrennungs- und Abwasseraufbereitungsanlagen, unterschiedliche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

In der Schweiz

Die politische Unterstützung für BECCS-Technologien in der Schweiz ist erst in der Entwicklung. Zu den ersten Maßnahmen gehören (i) die Anerkennung von CCS-Projekten als Kompensationsprojekte im Rahmen der CO₂ -Verordnung, (ii) die zweckgebundene Finanzierung von rund 60 Mio. CHF durch die [Stiftung Klimarappen](#)³⁸ für NET- und CCUS-Projekte sowie (iii) [eine Vereinbarung](#)³⁹ zwischen der Schweizer Regierung und dem Verband der Schweizer Müllverbrennungsanlagenbetreiber (VBSA). Diese Vereinbarung verpflichtet die KVA-Betreiber, mindestens eine CCS-Anlage mit einer Kapazität

³⁵ <https://www.holzenergie.ch/>

³⁶ <https://www.risiko-dialog.ch/>

³⁷ <https://www.carbon-removal.ch/de/>

³⁸ <https://www.klimarappen.ch/en/Negative-emissions-technologies.1.html>

³⁹

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/branchenvereinbarungen/vereinbarung-kehrichtholzverbrennungsanlagen.html>

von mindestens 100'000 tCO₂ pro Jahr bis 2030 in Betrieb zu nehmen. Um sicherzustellen, dass dieses Ziel erreicht wird, wurden mehrere qualitative Meilensteine mit spezifischen Fristen vereinbart, z. B. für die Abschätzung des Potenzials für CCS in allen KVA-Anlagen, die Festlegung des Projektstandorts, die Fertigstellung des Bauprojekts usw. Wird das Ziel trotz der Massnahmen nicht erreicht, müssen die KVAs am Schweizer ETS teilnehmen.⁴⁰

Artikel 6 des kürzlich verabschiedeten Klima- und Innovationsgesetzes (Schweizerische Eidgenossenschaft 2022) sieht eine Förderung in Höhe von bis zu 1,2 Milliarden Franken vor, um Industrie- und Gewerbebetriebe zu unterstützen, die innovative klimafreundliche Technologien einsetzen, um ihre Netto-Null-Emissionspläne (teilweise) zu erfüllen. Der Bundesrat muss die Voraussetzungen für den Zugang zu dieser Finanzierung noch regeln. Es ist jedoch davon auszugehen, dass CCUS-Technologien - einschließlich BECCS - eingeschlossen sein werden.

BECCS in Zementwerken fallen derzeit unter das Schweizer Emissionshandelssystem, das bisher keine Möglichkeit zur Ausstellung von Gutschriften für Emissionszertifikate vorsieht (siehe weitere Diskussion über BECCS und das Emissionshandelssystem unten). Holzenergieanlagen sind vom Schweizer ETS ausgenommen.

International

Laut der IEA Policies-Datenbank⁴¹ haben mehrere Länder, darunter Australien, Kanada, Dänemark, die EU, Finnland, Deutschland, die Niederlande, Norwegen, Schweden, das Vereinigte Königreich und die USA, Regelungen zur finanziellen Unterstützung von Investitionen in CCUS-Technologien eingeführt, in der Regel als Teil von Konjunkturpaketen für die Zeit nach Covid. Einige dieser Massnahmen, z.B. innerhalb der EU, werden teilweise aus den Einnahmen der Versteigerung von Zertifikaten im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems finanziert. Neben diesem Mechanismus zielt nur der dänische NECCS-Fonds auch noch speziell auf biogene CO₂ Quellen.

Zu den weiteren Fördermassnahmen in den OECD-Ländern gehören Betriebskostenzuschüsse für CCUS-Projekte, die eine Unterstützung pro Tonne abgeschiedenem CO₂ bieten und in Australien (CCS Hubs and Technologies Programme) und den Niederlanden (SDE++ Subsidy Fund) eingeführt wurden, sowie Steuergutschriften für CCUS-Investitionen. In Kanada werden solche Steuergutschriften auf einer prozentualen Basis festgelegt, wobei die Sätze nach 2031 sinken, um eine schnelle Einführung zu fördern. In den USA wurden mit der Steuergutschrift nach Section 45Q bestimmte Beträge pro Tonne dauerhaft gespeicherten CO₂ festgelegt. Für DACS werden höhere Sätze gewährt als für alle anderen CCUS-Technologien. Während in Kanada Enhanced Oil Recovery (EOR)-Projekte nicht für die Steuergutschrift in Frage kommen, wird in den USA ein niedrigerer Satz gewährt.

Darüber hinaus hat Schweden eine umgekehrte Versteigerung angekündigt, um speziell Investitionen in Bio-CCS-Anlagen zu unterstützen, mit dem Ziel, diese Technologie zu fördern und gleichzeitig niedrige Kosten zu begünstigen. Während die erste Auktion für 2023 geplant ist, wird die erste Zahlung voraussichtlich 2026 ausgezahlt, nachdem sowohl das Projekt als auch die Speicherung organisiert wurden.

BECCS-Anlagen fallen derzeit nicht in den Anwendungsbereich des EU-Emissionshandelssystems, aber es gibt Ideen, wie das EU-Emissionshandelssystem zu diesem Zweck geändert werden könnte. Im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems müsste dafür gesorgt werden, dass das Angebot an Emissionszertifikaten wahrscheinlich vor 2050 null oder sogar eine negative Zahl erreichen, damit die EU ihr Netto-Null-THG-Emissionsziel mit diesem Instrument erreichen kann. Bei Beibehaltung des derzeitigen Absenkungsfaktors würde Null bereits 2039 erreicht. Unter diesen Umständen könnte das EU-Emissionshandelssystem nur fortgeführt werden, wenn Gutschriften für die CO₂-Entfernung eingeführt werden. Cap-and-Trade-Systeme sind jedoch bislang nicht auf negative Emissionen ausgerichtet und berücksichtigen diese Möglichkeit nicht, da sie von der Annahme ausgehen, dass es

⁴⁰ Verzögert sich jedoch der Betrieb der Anlage aufgrund von behördlichen Verzögerungen oder Einsprüchen betroffener Dritter, kann die Frist um bis zu zwei Jahre verlängert werden.

⁴¹ <https://www.iea.org/policies>

Anlagen gibt, die Emissionen erzeugen, für die Zertifikate abgegeben werden müssen. Die derzeitige Fassung der ETS-Richtlinie schafft zwar Anreize für den Einsatz von CCS bei Anlagen mit «positiven» Emissionen, indem sie vorsieht, dass für Emissionen, die abgeschieden und in eine zugelassene Speicherstätte überführt wurden, keine Zertifikate abgegeben werden müssen (Artikel 12 Absatz 3a). Dieser Anreiz ist damit jedoch auf die Verarbeitung fossiler Brennstoffe sowie Zement beschränkt. Aus diesen Gründen bietet das ETS noch keine Rechtsgrundlage für die Generierung von Gutschriften für die CO₂-Entfernung (Rickels et al. 2020).

Es gibt mehrere Vorschläge, wie das EU-Emissionshandelssystem geändert werden könnte, damit Emissionsminderungsgutschriften einbezogen werden können (Rickels et al. 2020). Eine Option könnte darin bestehen, Gutschriften für die Emissionsentfernung ähnlich wie die flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls zu integrieren, wobei Mengen- und Sektorbegrenzungen verwendet werden, um den Anreiz für tatsächliche Emissionsminderungen nicht zu verwässern. Solange jedoch negative Emissionstechnologien gegenüber konventionellen Emissionsminderungstechnologien nicht wettbewerbsfähig sind, würde ein solches System nicht ausreichen, um Anreize für ihre Einführung zu schaffen. In diesem Fall wäre die Verpflichtung, eine Mindestmenge an Emissionsentfernungsgutschriften zu verwenden, eine bessere Option, um ihre Entwicklung zu fördern. Eine weitere Option wäre die Zulassung von Biomasseanlagen zum EHS. Da jedoch die vorgelagerten Emissionen und die CO₂-Entfernung während der Biomasseerzeugung derzeit im Rahmen der LULUCF-Verordnung angerechnet werden, könnte dies zu einer Doppelzählung dieser vorgelagerten Emissionen im Rahmen der LULUCF-Verordnung und des EU-EHS führen. Dieses Problem könnte umgangen werden, indem den Biomasseanlagen kostenlose Zertifikate zugeteilt werden, die sie verkaufen könnten, sobald sie ihr biogenes CO₂ (Rickels et al. 2020).

Laut cdr.fyi wurden einige BECCS-Abscheidungen auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt gehandelt, aber keines der aufgelisteten Projekte hat bisher Einheiten geliefert.

2.4.8 Bilanzierung

Bilanzierung im nationalen Treibhausgasinventar

Die IPCC-Leitlinien für nationale Inventare enthalten klare Richtlinien für die Anrechnung der Abscheidung und (unterirdischen) Speicherung von CO₂ aus Punktquellen. Diese bezieht sich auf alle Aktivitäten, die die geologische Speicherung von CO₂ (CS) beinhalten - unabhängig von der Herkunft des Kohlenstoffs (biogen oder fossil). Die Anrechnung einer Emissionsreduktion erfolgt im emittierenden Sektor, während das gespeicherte CO₂ zusätzlich als Position im Energiesektor des Speicherlandes vermerkt wird (ohne jedoch hier die Emissionsdaten zu verändern). Unklarheit besteht jedoch in Fällen von internationalem Verschieben des CO₂ für CO₂-Abscheidung: In der einen Interpretation sollte die entstehende CO₂-Entfernung im Treibhausgasinventar des abscheidenden Landes angerechnet werden (während das speichernde Land ausschliesslich den Vermerk der Speicherung im Energiesektor vornimmt). Gemäss einer zweiten Interpretation würde jedoch das speichernde Land erst die Einspeicherung bilanzieren (welches dieses dann allenfalls als ITMO wiederum ans abscheidende Land verkaufen könnte). Sollte es während des Transports oder der Lagerung des CO₂ zu einer Leckage kommen, so muss die so emittierte CO₂ Menge im *Energiesektor des Landes* angegeben werden, in dem die Leckage physisch stattgefunden hat (Eggelston et al. 2006, Chapter 5, Section 5.10).

Baseline- und Monitoring-Berichterstattung und Überprüfung

Obwohl CCS-Projekte formell im Rahmen des Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung förderfähig sind, haben sie bisher keinen wirklichen Zugang zu den etablierten Märkten für den Kohlenstoffhandel. Allerdings haben sowohl das American Carbon Registry (ACR) als auch der Verified Carbon Standard (VCS) von Verra einschlägige MRV-Methoden (Monitoring, Reporting and Verification) eingeführt, die es ermöglichen Emissionsreduktionen oder Kohlendioxid Removal aus CCS-Aktivitäten anzurechnen und Einnahmen aus Verkäufen auf den freiwilligen Kohlenstoffmärkten zu erzielen. Darüber hinaus können CCS-Tätigkeiten grundsätzlich auch am entstehenden Markt für die Einhaltung des Pariser Abkommens (Artikel 6) teilnehmen, sobald die Methoden angenommen sind und die Aufsichtsbehörde die Anforderungen für diese Methoden vollständig entwickelt hat.

2.4.9 Offene Fragen

- Sollte Holz gar nicht mehr verbrannt, sondern nur noch pyrolysiert, hydrothermal carbonisiert oder vergast werden? Wie also steht BECCS in Konkurrenz mit Biochar und wo liegen die optimalen Nutzungsverhältnisse?
- Welche Szenarien brauchen wir, wie werden diese erstellt und ausgewählt, um ein möglichst sinnvolles Energiegesamtsystem zu erhalten.
- Wie lösen wir folgenden Zielkonflikt: CCS reduziert den Output einer KVA thermisch und elektrisch. Woher kommt die Ersatzenergie hierfür bzw. wie ist die Gesamt-Umweltbelastung, wenn man dann insgesamt eine höhere Menge (allenfalls fossiler Stoffe) verbrennt, um die Wärme im Winter sicher zu stellen? Wie werden hier die Emissionen berechnet (z.B. wenn Fernwärme fossil erzeugt werden müsste, infolge Betrieb CCS im Winter)?
- Welche Energieströme sind insgesamt gesehen sinnvoller / ressourceneffizienter / klimafreundlicher zusätzlicher Strom / Wärmeerzeugung, um die Energieaufwände für CC zu kompensieren, oder Verzicht auf CC und dafür weniger Energiebedarf.
- Wer trägt die Betriebskosten z.B. einer KVA CCS-Anlage? Braucht man gemäß Verursacherprinzip eine Erhöhung der Gebühr auf dem Abfallsack oder wie kann man die Abscheidung finanzieren? Was gibt es für alternative Finanzierungsmodelle?
- Wie kann der Gesetzgeber erreichen, dass klimaschädliche Systeme, z.B. in der Fernwärme, sich nicht mehr lohnen und diese auf alternative, klimaneutrale Systeme umstellen?

2.5 Direct Air Capture (DAC)

2.5.1 Allgemeine Beschreibung

Bei Technologien zur direkten Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) werden große Luftmengen mit chemischen Sorptionsmitteln in Kontakt gebracht. In regenerativen Zyklen wird dann atmosphärisches CO_2 abgeschieden und konzentriert, um es sicher zu speichern. DAC ist eine Technologie, die die räumlichen und Landnutzungs-Beschränkungen vermeidet, die z.B. mit großflächiger Aufforstung und BECCS verbunden sind. DAC bietet so erhebliche Flexibilität bei der Standortwahl, so dass sie in jedem Gebiet mit reichlich kohlenstoffarmer Energie und Zugang zu CO_2 Speicher- oder Nutzungsmöglichkeiten platziert werden kann. Die Anlagen können auch in der Nähe bestehender oder geplanter CO_2 Transport- und Speicherinfrastrukturen aufgestellt werden. DAC-Anlagen wurden bereits erfolgreich in verschiedenen Klimazonen in Europa und Nordamerika betrieben, weitere Tests an Standorten mit extremen Klimabedingungen wie Trockenheit und hoher Luftfeuchtigkeit sind im Gange.

DAC kann in zwei Haupttypen mit unterschiedlichen Methoden unterteilt werden: Feste Niedertemperatur-Technologien (S-DAC) und flüssige Hochtemperatur-Technologien mit Sorptionsmitteln (L-DAC) (siehe Abbildung 22) (McQueen et al. 2020). Im Fall von **DAC mit festem Sorptionsmittel** wird der Prozess in Chargen durchgeführt und umfasst verschiedene Adsorptions- und Regenerationsphasen, die Temperatur- und / oder Vakuumschwankungen bei ca. $100\text{ }^\circ\text{C}$. Die Adsorption an das feste Sorptionsmittel kann durch schwache intermolekulare Kräfte, Physisorption oder Chemisorption erfolgen, wobei häufig amin-artige Gruppen auf hochporösen, großflächigen Materialien verwendet werden. In der anschließenden Regenerationsphase wird das konzentrierte CO_2 zur Speicherung freigegeben.

Die Flüssig-DAC (L-DAC) arbeitet mit einem doppelten geschlossenen Kreislaufsystem. Der erste Kreislauf findet in einer als Kontaktor bezeichneten Vorrichtung statt, in der atmosphärische Luft einer alkalischen Lösung ausgesetzt wird (wie Kaliumhydroxid zur Bildung von K_2CO_3), um CO_2 abzuscheiden. Im anschließenden Kreislauf wird das abgeschiedene CO_2 durch eine Abfolge von Einheiten (Ionenaustausch von Kali K_2CO_3 mit Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, anschließende Kalzinierung von CaCO_3 bei ca. $900\text{ }^\circ\text{C}$, gefolgt von der Bildung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus dem Kalzinierungsprodukt CaO) aus der Lösung freigesetzt. Die energieintensive Natur von L-DAC, vor allem aufgrund des hohen Temperaturbedarfs, war bisher ein Hindernis für die breite Anwendung.

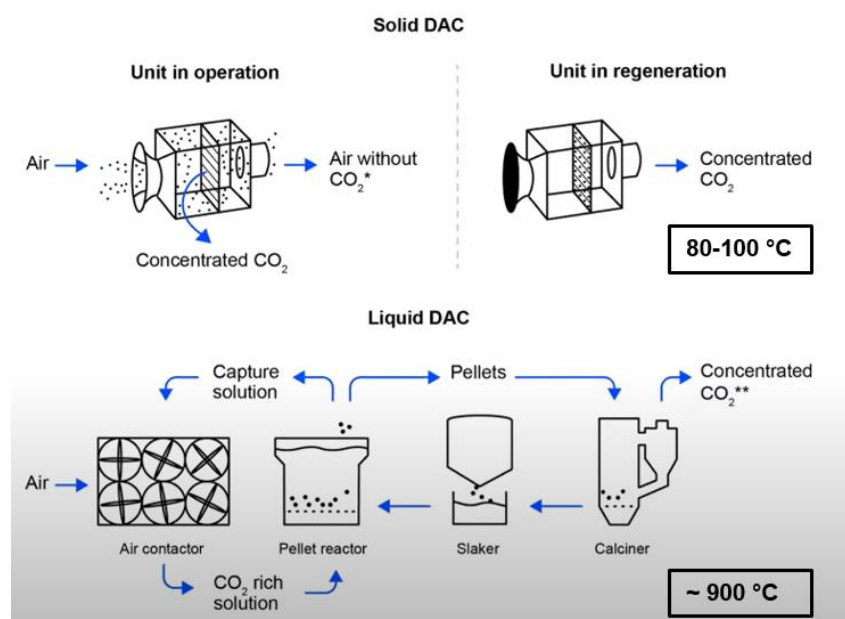


Abbildung 22: S-DAC (oben) und L-DAC (unten) Konfigurationen (International Energy Agency 2022, p. 22).

2.5.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber

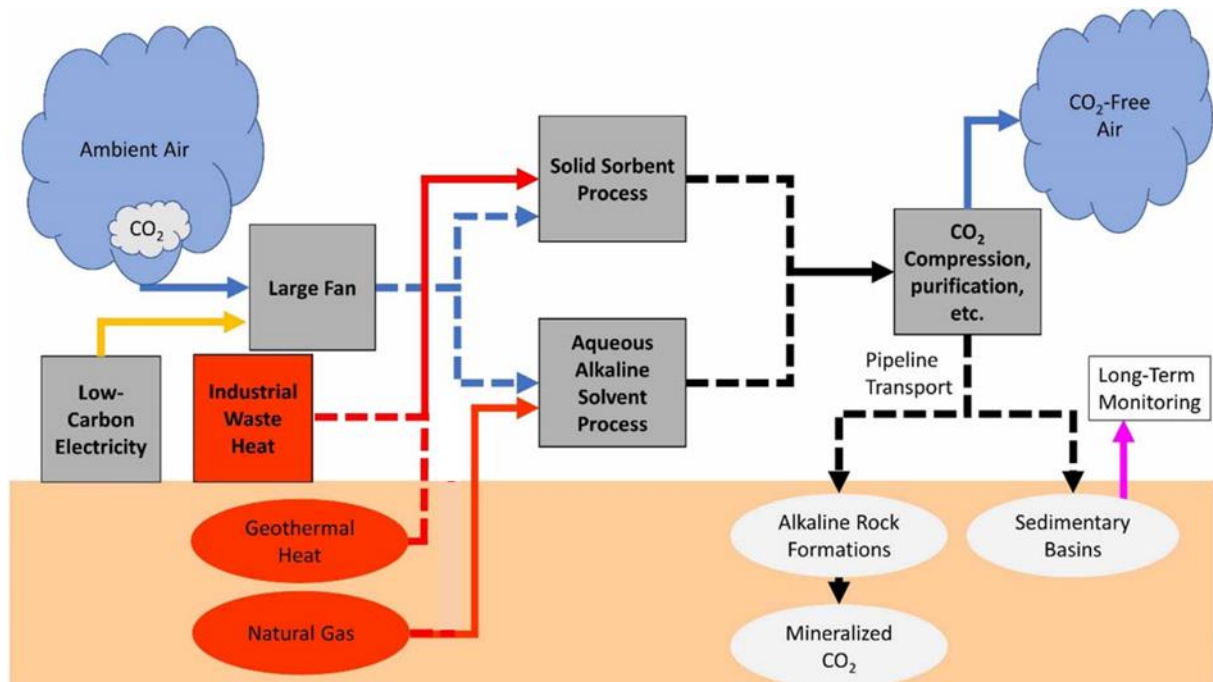


Abbildung 23: Schematisches Prozessdiagramm von DACCS-Systemen (angepasst von Sovacool et al. 2022).

Zu den wichtigsten Prozessen innerhalb der Systemgrenzen von DACCS für die Anrechnung der effektiven CDR, der Klimaauswirkungen und anderer Umweltbelastungen von DACCS gehören - unabhängig davon, ob das DAC-Verfahren auf einem Lösungsmittel oder einem Sorptionsmittel basiert - die Bereitstellung von Wärme und Strom für das DAC-Verfahren, der CO₂ Transport und die Injektion in geologische Lagerstätten sowie der Bau und die Instandhaltung der Infrastruktur der DAC-Anlage sowie der CO₂ Transport und die Injektion (Abbildung 23). Darüber hinaus muss durch eine langfristige Überwachung sichergestellt werden, dass kein CO₂ aus den geologischen Reservoirs entweicht.

Verfügbare LCA-Studien, die sowohl für Hoch- als auch für Niedertemperatur-DAC-Prozesse (d. h. lösungsmittel- bzw. sorptionsmittelbasiert) durchgeführt wurden, zeigen, dass die für den DAC-Prozess verwendeten Energiequellen und die damit verbundenen THG-Emissionen der Hauptfaktor für die Wirksamkeit von CDR auf Basis von DACCS sind (Deutz und Bardow 2021; Qiu et al. 2022; Terlouw, Treyer, et al. 2021). Eine hohe Wirksamkeit von DACCS im Hinblick auf CDR kann nur erreicht werden, wenn die mit der Wärme- und Stromversorgung für den DAC-Prozess verbundenen THG-Emissionen gering sind.

2.5.3 Co-Benefits

Die DAC-Technologie bietet mehrere zusätzliche Vorteile, die teilweise auch klimarelevant sind:

- **Die direkte Abscheidung** ermöglicht die direkte Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre Ortsunabhängig und trägt damit zu den weltweiten Bemühungen um die Verringerung der Treibhausgasemissionen und die Bekämpfung des Klimawandels bei. Wenn dies am Ort der Sequestrierung geschieht und erneuerbare Energie zur Verfügung steht, ist kein Transport von CO₂ über lange Strecken erforderlich.
- **Kohlenstoffnutzung** - Abgeschiedenes CO₂ kann auf verschiedene Weise genutzt werden, z.B. bei der Herstellung von synthetischen Brennstoffen, Chemikalien oder Baumaterialien,

wodurch sich Möglichkeiten zur Kohlenstoffnutzung ergeben und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringert wird.

- **Integration erneuerbarer Energien** - DAC-Anlagen müssen mit erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. So können sie z.B. als flexibler Verbraucher genutzt werden, wenn es Energieüberschuss gibt und damit die Integration sauberer Energietechnologien zu erleichtern.

2.5.4 Risiken und Herausforderungen

- **Auswirkungen auf die Umwelt** - Bau, Betrieb und Wartung von DAC-Anlagen haben Auswirkungen auf die Umwelt, einschließlich Landnutzung, Wasserverbrauch und potenzieller Freisetzung von Chemikalien, die bei der Abscheidung und Lagerung verwendet werden. Die Sicherstellung eines angemessenen Umweltmanagements und die Minimierung negativer Auswirkungen sind von wesentlicher Bedeutung.
- **Energieintensiv** - DAC-Prozesse erfordern in der Regel eine beträchtliche Menge an Energie, die auch aus nicht erneuerbaren Quellen stammen kann. Wenn das passiert, dann wird die Nettobilanz viel schlechter ausfallen und allenfalls wird die gesamte Kohlenstoffreduzierung zunichte gemacht.
- **Wettbewerb** - die DAC-Dienstleistung kann auch von BECCU/CCS erbracht werden, wobei Pflanzen als DAC-Einheiten verwendet werden.
- **Kosten** - Die derzeitigen DAC-Technologien sind teuer und noch nicht in großem Maßstab kommerziell nutzbar. Für eine breitere Akzeptanz sind Kostensenkungen und technologische Fortschritte erforderlich.
- **Herausforderungen in Bezug auf Größe und Einsatz** - Die Skalierung der DAC-Technologie zur Abscheidung großer CO₂-Mengen ist eine große Herausforderung. Der Bau und Einsatz von DAC-Anlagen in der erforderlichen Größenordnung und an verschiedenen geografischen Standorten kann logistische und infrastrukturelle Herausforderungen mit sich bringen.

2.5.5 Potentiale

Die Zahl der weltweit in Betrieb befindlichen DAC-Anlagen hat in den letzten Jahren zugenommen. Diese Anlagen sind derzeit noch klein und können zusammen etwa 0,01 MtCO₂ pro Jahr einfangen. Es gibt jedoch Fortschritte bei der Entwicklung einer groß angelegten DAC-Anlage mit einer Kapazität von 1 MtCO₂ pro Jahr. Um Netto-Null-Emissionen zu erreichen, muss der Einsatz von DAC in diesem Jahrzehnt erheblich gesteigert werden. Im IEA-Szenario "Netto-Null-Emissionen bis 2050" nimmt der Einsatz von DAC rasch zu und erreicht im Jahr 2030 etwa 85 MtCO₂, im Jahr 2040 620 MtCO₂ und im Jahr 2050 980 MtCO₂ (International Energy Agency 2022).

Zwischen 2020 und 2050 wird erwartet, dass etwa 12 GtCO₂ kumulativ durch DAC aufgefangen werden. Dies entspricht etwa 13 % aller erfassten CO₂ Emissionen, wobei 64 % dieser erfassten CO₂ gespeichert werden. Dieser bedeutende Beitrag von DAC trägt in Verbindung mit BECCS dazu bei, alle verbleibenden Emissionen aus dem Verkehrs-, Industrie- und Gebäudesektor auszugleichen und zu kompensieren, wodurch das Erreichen eines Energiesystems mit Netto-Null-Emissionen ermöglicht wird (International Energy Agency 2022).

Im Jahr 2050 werden nach dem IEA-Szenario "Netto-Null-Emissionen bis 2050" etwa 350 Mio. t CO₂ zusammen mit Wasserstoff zur Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffkraftstoffe verwendet, was 36 % des direkt aus der Atmosphäre abgeschiedenen CO₂ entspricht. Diese Kraftstoffe sind in erster Linie für die Luftfahrt bestimmt, wo sie etwa ein Drittel des Kraftstoffbedarfs der Branche decken. Durch die Verwendung von aus der Luft abgeschiedenem CO₂ können diese synthetischen Kraftstoffe während ihres gesamten Lebenszyklus klimaneutral sein, da das bei der Verbrennung freigesetzte CO₂ durch die ursprüngliche Abscheidung ausgeglichen wird. Dies unterstreicht die Bedeutung von DAC als eine der begrenzten Lösungen zur Emissionsminderung im schwierigen Luftfahrtsektor, der nach wie vor einer der am schwierigsten zu dekarbonisierenden Bereiche ist.

In einer Studie von Shayegh et al. (2021) wurden 18 Experten aus verschiedenen Branchen und Hochschulen zu negativen Emissionen und DAC sowie zu den damit verbundenen wirtschaftlichen und politischen Aspekten befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Hälfte der Experten (50 %) glaubt, dass

fehlende politischen Maßnahmen und Vorschriften das künftige Wachstum der DAC-Technologien behindern wird. Darüber hinaus betonten 44 % der Experten die Bedeutung von Innovationen bei der Verringerung der Energieintensität des DAC-Prozesses und der Integration mit erneuerbaren Energiequellen. Überraschenderweise zeigt die Studie, dass "Soziale Akzeptanz" und "Speicherkapazität" von den Experten mit nur 22 % bzw. 17 % der Stimmen als wenig problematisch gesehen wurde. Dies deutet darauf hin, dass die Experten zuversichtlich sind, dass es genügend geologische Speicherkapazität für die dauerhafte CO₂ Sequestrierung gibt und dass die Öffentlichkeit bereit ist, DAC zu akzeptieren, solange es angemessene politische und regulatorische Unterstützung gibt. Abbildung 24 veranschaulicht die Rangfolge der einschränkenden Faktoren.

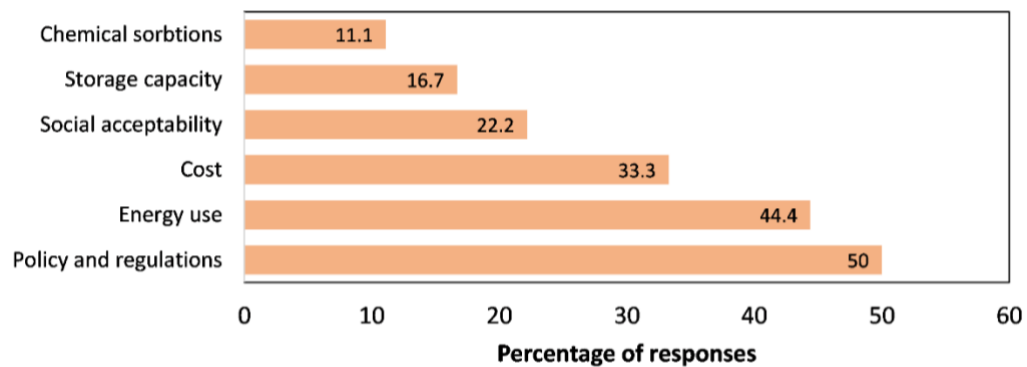


Abbildung 24: Expertenmeinung zu Faktoren, die die DAC Entwicklung begrenzen.
(adapted from Shayegh et al. 2021).

2.5.6 Kosten und wichtigste Treiber

Wie bereits erwähnt, benötigen DAC-Systeme für ihren Betrieb eine beträchtliche Menge an Energie und sind daher auf eine zuverlässige und erneuerbare Energiequelle angewiesen. In der Schweiz stehen viele erneuerbare Energiequellen zur Verfügung, darunter Wasserkraft, Solarenergie, Windenergie und geothermische Energie zum Heizen. Während die Wasserkraft derzeit die dominierende Energiequelle im Land ist, gibt es nur begrenzten Spielraum für einen Ausbau. Darüber hinaus steht die Windenergie aufgrund der geringeren Windgeschwindigkeiten als an den Küsten, der Bemühungen um den Schutz der natürlichen Landschaft und der bisher geringen Akzeptanz in der Bevölkerung vor Herausforderungen. Die Fotovoltaik hat jedoch das Potenzial für eine weitere Entwicklung, selbst bei geringer Einstrahlung. Dieser Bericht konzentriert sich auf die Untersuchung der Machbarkeit und Kosteneffizienz der Integration von PV und Windkraft als primäre Stromquelle für DAC-Systeme. Wärmepumpen, die mit erneuerbarem Strom betrieben werden, können auch zur Wärmeversorgung dieser Systeme eingesetzt werden.

Die Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE) und der Wärmegestehungskosten (LCOH) ist ein wichtiges Instrument zur Bewertung der Kosteneffizienz verschiedener Stromquellen über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks. Die LCOE- und LCOH-Berechnungen für PV, Wind und Wärmepumpen basieren auf verschiedenen Faktoren, darunter die anfänglichen Kapitalkosten des Systems, die laufenden Wartungs- und Betriebskosten, die voraussichtliche Lebensdauer des Systems und die geschätzte Menge an Strom (oder Wärme), die das System während seiner Lebensdauer produzieren wird. Außerdem werden bei der Berechnung die Kosten für die Finanzierung des Systems berücksichtigt, einschließlich der Zinssätze und der Laufzeit des Kredits. Die LCOE- und LCOH-Berechnungen sind wichtige Messgrößen für Investoren und politische Entscheidungsträger, da sie eine umfassende Analyse der langfristigen finanziellen Tragfähigkeit eines Projekts liefern. Niedrige LCOE sind ein Indikator für eine kosteneffektive und wettbewerbsfähige Stromquelle und damit ein wertvolles Instrument für die Entscheidungsfindung bei der Umsetzung von Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien.

Die folgenden Gleichungen wurden zur Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE) und der Wärmegestehungskosten (LCOH) verwendet (Fasihi et al. 2019).

$$LCOE = \frac{Capex \cdot crf + Opex_{fix}}{FLh} + Opex_{var} + \frac{fuel}{\eta}$$

$$LCOH = \frac{Capex \cdot crf + Opex_{fix}}{FLh} + Opex_{var} + \frac{fuel}{\eta} + \frac{LCOE}{COP}$$

$$crf = \frac{WACC \cdot (1 + WACC)^N}{(1 + WACC)^N - 1}$$

Wobei:

- Capex = Investitionsausgaben,
- crf = Annuitätsfaktor,
- Opex = jährliche Betriebsausgaben,
- fix = fix,
- var = variabel,
- FLh = Volllaststunden pro Jahr,
- fuel = Kraftstoffkosten,
- η = Effizienz,
- COP = Leistungskoeffizient von Wärmepumpen,
- WACC = gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz,
- N = Lebensdauer.

Kostendaten - Die Kosteninformationen für die drei Technologien (PV, Wind und Wärmepumpen) stammen aus dem Schweizer TIMES Energy Systems Model (STEM) (Kannan und Turton 2014).

PV-Profil Schweiz - Nennenswerte Beispiele für Schweizer Kantone mit relativ sonnigen Bedingungen sind Wallis, Tessin und Basel. Um das Solarpotenzial dieser Standorte zu ermitteln, wurden die PV-Profile von der Website *Renewables.ninja* abgerufen.⁴² Auf der Grundlage der verfügbaren Daten aus dem Jahr 2019 wurde festgestellt, dass das Wallis einen hohen FLh-Wert von 1550 Stunden aufweist, was auf eine beträchtliche Menge an Solarstromerzeugung hinweist. Das Tessin, eine weitere sonnenverwöhnte Region, wies einen FLh-Wert von 1400 Stunden auf, während Basel einen respektablen FLh-Wert von 1281 Stunden verzeichnete. Diese Zahlen unterstreichen die solare Produktivität dieser Kantone und machen sie zu günstigen Gebieten für die Nutzung der Sonnenenergie.

In den letzten Jahren haben [alpine Solaranlagen](https://www.alpinsolar.ch/ch/de/home.html)⁴³ aufgrund ihres bemerkenswerten Stromerzeugungspotenzials, insbesondere in den Wintermonaten, grosses Interesse geweckt. Ein Beispiel dafür ist der Stausee in den Glarner Alpen, der auf 2500 Metern Höhe liegt und eine 2,2-MW-PV-Anlage beherbergt, die von Axpo und IWB gebaut wurde. Die an diesem Standort erhobenen Daten ergaben einen beeindruckenden FLh-Wert von 1500 (siehe Abbildung 25).

⁴² <https://www.renewables.ninja>

⁴³ <https://www.alpinsolar.ch/ch/de/home.html>

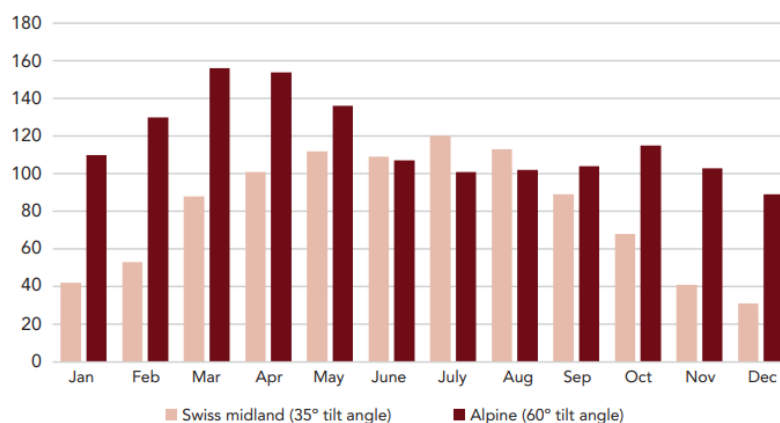


Abbildung 25: Jährliches Produktionsprofil von alpinen Solaranlagen im Vergleich zu Midlands. Alpine Solaranlagen erzeugen in den Wintermonaten deutlich mehr Strom als die Anlagen in den Midlands.⁴⁴

Tabelle 5: Schätzung der LCOE der nicht-alpinen PV in der Schweiz, heute und in Zukunft. Kostenspezifische Informationen sind Kannan und Turton entnommen (2014).

		2020	2030	2040	2050
Capex	CHF/ kW _e	900	500	400	400
Opex fix	% der Investitionsausgaben p.a.	1.5	1.5	1.5	1.5
Opex variabel	CHF/kWh _{el}	0	0	0	0
Lebensdauer	Jahre	20	30	35	40
WACC	%	5	5	5	5
FLh	Stunden	1400	1400	1400	1400
LCOE_{PV}	CHF/ MWh_{el}	62	34	28	27

Windenergie - Die Stromgestehungskosten der Windenergie werden in erster Linie von zwei Faktoren beeinflusst: den spezifischen Windverhältnissen an einem Standort und dem technologischen Reifegrad, der zur Nutzung dieser Verhältnisse eingesetzt wird. Folglich können die LCOE zwischen verschiedenen Ländern oder Standorten erheblich variieren. Die laufenden Fortschritte in der Windturbinentechnologie konzentrieren sich derzeit darauf, eine höhere Energieproduktion zu erreichen, vor allem durch größere Turmhöhen oder eine größere Rotorausladung. Der erhöhte Materialeinsatz muss jedoch durch eine erhebliche Steigerung der Volllaststunden ausgeglichen werden, damit die höheren Investitionskosten wirtschaftlich tragbar sind. Diese Verbesserungen dürften insbesondere dem Einsatz von Schwachwindanlagen zugute kommen.

Wir haben die [öffentlich zugänglichen Daten des BFE](https://www.bfe.admin.ch/dam/bfe/de/daten/oeffentlich-zugangliche-daten-des-bfe.pdf)⁴⁵ genutzt, um Informationen über die Windverhältnisse und die Anzahl der Betriebsstunden von Windturbinen unter Volllast in der Schweiz zu sammeln. Das BFE stellt Daten über die in Betrieb befindlichen Windturbinen in der Schweiz zur Verfügung, die Aufschluss über deren Typen und die von ihnen erzeugte Strommenge geben. Die **Volllaststunden (FLh)** werden unter Berücksichtigung der Grösse der Windturbine und ihrer jährlichen Stromproduktion bestimmt.

Wärmepumpe - Elektrische Kompressionswärmepumpen wurden zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Die kostenspezifischen Daten sind der STEM-Datenbank entnommen. Die LCOH werden für den Betrieb der Wärmepumpe auf der Basis von Wind und PV berechnet, d.h. es werden die gleichen FLh für die Wärmepumpe berücksichtigt.

⁴⁴ <https://www.axpo.com/ch/en/about-us/energy-knowledge/detail.html/energy-knowledge/pioneer-project-in-the-swiss-alps.html>

⁴⁵ <https://opendata.swiss/en/dataset/windenergieanlagen>

Tabelle 6: Informationen zu den Volllaststunden der in der Schweiz installierten Windenergieanlagen von 2018 bis 2022.

Jahr	Martigny VS	Peuchapatte JU	St. Brais JU	Haldenstein GR
	2MW Enercon, 100 m	3* 2,3 MW Enercon, 108 m	2* 2 MW Enercon, 78 m	3 MW Vestas, 119 m
2018	2233	1808	1703	1640
2019	2226	2217	2098	1543
2020	2272	2246	2006	1513
2021	2220	2077	1971	1459
2022	2236	2125	1975	1488
Avg. FLh	2237	2094	1950	1529

Tabelle 7: Schätzung der Stromgestehungskosten für Windenergieanlagen in der Schweiz, heute und in Zukunft. Kostenspezifische Informationen sind aus der STEM-Datenbank (Panos et al. 2022, 2023).

		2020	2030	2040	2050
Capex	CHF/ kW _e	2300	2200	2100	2000
Opex fix	% der Investitions- ausgaben p.a.	2	2	2	2
Opex variabel	CHF/kWh _{el}	0	0	0	0
Lebensdauer	Jahre	25	25	25	25
WACC	%	5	5	5	5
FLh	Stunden	2200	2200	2200	2200
LCOE_{wind}	CHF/ MWh_{el}	81	77	74	71

*Tabelle 8: LCOH für elektrische Kompressionswärmepumpen.
Die COP-Daten stammen aus Fasihi et al. (2019).*

		2020	2030	2040	2050
Capex	CHF/ kW _e	360	360	360	360
Opex fix	% der Investitions- ausgaben p.a.	1	1	1	1
Opex variabel	CHF/kWh _{th}	0	0	0	0
Lebensdauer	Jahre	25	25	25	25
WACC	%	5	5	5	5
COP	-	3	3.26	3.41	3.51
LCOH_{heat pump} (basierend auf LCOE _{wind})	CHF/ MWh_{th}	40	36	34	32
LCOH_{heat pump} (basierend auf LCOE _{PV})	CHF/ MWh_{th}	49	39	36	35

Levelized Cost Of DAC (LCOD) - Die folgende Gleichung wird zur Berechnung der LCOD verwendet:

$$LCOD = \frac{Capex_{DAC} \cdot crf + Opex_{fix}}{Output_{CO_2}} + LCOE_{DAC, input} + LCOH_{DAC, input}$$

Fasihi et al. (2019) führten eine Literaturrecherche zu DAC durch und stellten erhebliche Schwankungen beim gemeldeten oder geschätzten Energieverbrauch und den mit dieser Technologie verbundenen

Kosten fest. In Anbetracht des hohen Maßes an Unsicherheit und der uneinheitlichen Daten in der Literatur in Bezug auf die technisch-wirtschaftlichen Aspekte der DAC-Technologien bis zum Jahr 2050 werden für die Analyse in diesem Bericht drei Parametersätze verwendet: DAC-Systemkosten, Energiebedarf und Lebensdauer. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 gezeigt. Die Aufschlüsselung der Kosten für den LCOD zeigt, dass im Jahr 2020 ein erheblicher Teil der gesamten Investitionskosten, nämlich 84 %, auf das DAC-System entfällt, siehe Abbildung 26. Obwohl die Kosten für das DAC-System bis 2050 deutlich sinken, würden immer noch mehr als 73% der Gesamtkosten hier anfallen. Unter der Annahme, dass die Kosten für Strom und Wärme bis 2050 unverändert bleiben, die Kosten für das DAC-System aber auf 200 CHF/tCO₂ sinken, machen die Kosten für das DAC-System den Berechnungen zufolge etwa 60 % der Gesamtausgaben aus.

Die Implementierung von DAC-Anlagen und Wärmepumpen erfordert beträchtliche Investitionen, so dass es von entscheidender Bedeutung ist, ihre Betriebszeit zu maximieren, indem sie mit hoher FLh betrieben werden. Diese hohe Verfügbarkeit von Strom ist für ihren effizienten Betrieb unerlässlich. Um eine konstante Versorgung mit erneuerbarem Strom zu gewährleisten, insbesondere in Systemen, die sich auf PV- und Windenergie stützen, ist der Einsatz von Batterien unerlässlich. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Berechnungen in Tabelle 9 die Einbeziehung von Batterien nicht berücksichtigen und die Nutzung von Netzstrom nicht vorsehen. Die DAC FLh im Falle von PV und Wind betragen 1400h bzw. 2200h. Durch die Verlagerung der DAC-Anlage in ein Land wie den Oman, wo reichlich Sonnenlicht zur Verfügung steht, kann die FLh deutlich auf hohe Zahlen, z. B. 1800 Stunden, ansteigen. Die Verfügbarkeit von Netzstrom ist eine weitere Möglichkeit, die FLh des DAC-Systems zu erhöhen. Diese verlängerte Betriebszeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Reduzierung der LCOD. Im Jahr 2020 sinkt der LCOD auf 414 CHF pro Tonne abgeschiedenes CO₂ und bis 2050 wird angenommen, dass es weiter auf 113 CHF pro Tonne abgeschiedenes CO₂ sinkt.

Tabelle 9 : Schätzung der LCOD für verschiedene Systeme heute und in der Zukunft.

	Einheit	2020	2030	2040	2050
Capex	CHF/ tCO ₂ · a	730	350	250	200
Opex fix	% der Investitionsausgaben p.a.	4	4	4	4
El. Nachfrage	kWh _{el} /tCO ₂	250	225	203	182
Niedriger Wärmebedarf	kWh _{th} /tCO ₂	1750	1500	1286	1102
Lebensdauer	Jahre	20	25	30	30
WACC	%	5	5	5	5
LCOD_{wind}	CHF/ tCO₂	425	205	143	119
LCOD_{PV}	CHF/ tCO₂	634	292	200	162

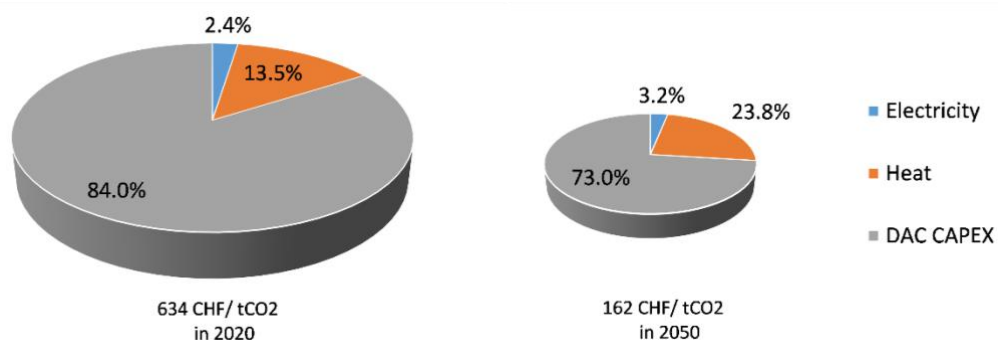


Abbildung 26: Aufschlüsselung der DAC-Kosten im Jahr 2020 gegenüber 2050.

2.5.7 Relevante Akteure

Derzeit gibt es 18 in Betrieb befindliche DAC-Anlagen in Kanada, Europa und den Vereinigten Staaten; insgesamt haben sie die Kapazität, jährlich fast 10 ktCO₂ abzuscheiden. (International Energy Agency 2022). Bei diesen Anlagen handelt es sich hauptsächlich um kleinere Anlagen, die sich auf den Verkauf des abgeschiedenen CO₂ für verschiedene Anwendungen konzentrieren. Die Nutzung des abgeschiedenen CO₂ umfasst die Verwendung in PtX-Prozessen zur Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen sowie die Anwendung bei der Karbonisierung von Getränken und in Gewächshäusern. Mehrere Unternehmen stehen bei der Vermarktung von DAC-Technologien an vorderster Front und treiben die Innovation und den Fortschritt in diesem Bereich voran.

Climeworks AG (S-DAC)⁴⁶ wurde 2009 in der Schweiz als Spin-off der ETH Zürich gegründet und hat weltweit mehr als 15 DAC-Anlagen erfolgreich in Betrieb genommen und betrieben, was zu mehr als 120.000 Betriebsstunden geführt hat. Ihr Niedertemperatur-Abscheidungsverfahren (100°C) wird ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben. In Island arbeiten Climeworks und Carbfix zusammen, um in der Orca-Anlage mit einer Nennkapazität von 4.000 tCO₂/Jahr CO₂ aus der Atmosphäre abzuscheiden. In der Mammoth-Anlage sollen 36.000 tCO₂/Jahr abgeschieden und anschließend durch CO₂ Mineralisierung in Basaltgestein unterirdisch gespeichert werden. Die Mineralisierung von CO₂ dauert nur ein paar Jahre. Die Mammoth-Anlage soll Ende 2024 in Betrieb genommen werden. Climeworks konzentriert sich auf die dauerhafte unterirdische Speicherung des abgeschiedenen CO₂ und bietet eine durch Dritte verifizierte Kohlendioxidbeseitigung (CDR). Climeworks CO₂ wird nicht für die verbesserte Ölgewinnung verwendet, ein Verfahren, bei dem abgeschiedenes CO₂ genutzt wird, um zusätzliches Öl aus Ölquellen zu pressen Enhanced Oil Recovery.

Carbon Engineering Ltd⁴⁷ (L-DAC) wurde 2009 in Kanada gegründet. Ihr Hochtemperatur-Abscheidungsverfahren (900°C) verwendet fossiles Erdgas. Das Unternehmen hat eine Pilotanlage erfolgreich in Betrieb genommen und vor kurzem eine Lizenzvereinbarung mit 1Pointfive⁴⁸, einer Tochtergesellschaft von Occidental Petroleum, geschlossen, um die künftige Errichtung einer größeren DAC-Anlage in den Vereinigten Staaten zu unterstützen. Diese Anlage, in der die DAC-Technologie von Carbon Engineering zum Einsatz kommt, soll schließlich eine Kapazität von bis zu 1 Million Tonnen CO₂ jährlich erreichen und Ende 2024 in Betrieb gehen. Das abgeschiedene CO₂ wird entweder unterirdisch gelagert oder bei der Produktion von Kohlenwasserstoffen (einschließlich Enhanced Oil Recovery) und Produkten wie Chemikalien und Baumaterialien verwendet.

Global Thermostat⁴⁹ (S-DAC), 2010 als Spin-off der Columbia University in den USA gegründet, hat bisher zwei Pilotanlagen erfolgreich in Betrieb genommen und arbeitet aktiv mit ExxonMobil, einem der größten Öl- und Gasunternehmen der Welt, zusammen, um seine Abscheidungstechnologie weiterzuentwickeln und zu vergrößern. Im April 2021 schloss Global Thermostat einen Vertrag mit HIF über die Lieferung von DAC-Ausrüstung für die Pilotanlage Haru Oni eFuels in Chile⁵⁰. In dieser Anlage soll abgeschiedenes CO₂ (250 kgCO₂ /h, das entspricht 2.000 tCO₂ /Jahr) mit elektrolytischem Wasserstoff kombiniert werden, um synthetisches Benzin herzustellen.

Zahlreiche kleinere Unternehmen befassen sich ebenfalls mit der Entwicklung von DAC-Technologien, darunter: Hydrocell⁵¹, Infinitree⁵², Skytree⁵³ und Soletair⁵⁴.

⁴⁶ <https://climeworks.com/>

⁴⁷ <https://carbonengineering.com/>

⁴⁸ <https://www.1pointfive.com/>

⁴⁹ <https://www.globalthermostat.com/>

⁵⁰ <https://hifglobal.com/location/haru-oni/>

⁵¹ <https://hydrocell.fi/en/about-us/>

⁵² <http://www.infinitreelc.com/#about>

⁵³ <https://skytree.eu/>

⁵⁴ <https://www.soletairpower.fi/>

2.5.8 Nationale und internationale Politiken und Anreize

In der Schweiz

In der Schweiz gibt es derzeit keine systematische Förderung von DACS. Das in der Schweiz ansässige Unternehmen Climeworks hat finanzielle Unterstützung für seine Forschungs- und Entwicklungsausgaben sowie für die Pilotierung von DACS in der Schweiz und im Ausland erhalten. Eine solche angebotsfördernde Politik wird jedoch nicht in der Lage sein, die erforderliche Skalierung um den Faktor 10 über die Zeit zu erreichen. Die Schweizer Regierung hat ihre Bereitschaft bekundet, den Kauf von DACS zu nutzen, um letztendlich Netto-Null-Emissionen zu erreichen, indem sie die Emissionen des Bundes durch DACS-Kompensationen ausgleicht, wobei die Vorbildfunktion im Klima und Innovationsgesetz in Artikel 10 vorbeschrieben ist.

International

Das Potenzial des DAC, zum Klimaschutz beizutragen, wird zunehmend anerkannt, was durch neue Initiativen des öffentlichen und privaten Sektors gefördert wird. Im Jahr 2021 stellten die Vereinigten Staaten 3,5 Mrd. USD für die Einrichtung von vier DAC-Hubs bereit und führten ein DAC-Preisprogramm ein, das 100 Mio. USD für kommerzielle Projekte und 15 Mio. USD für vorkommerzielle Projekte vorsieht. Das Vereinigte Königreich hat ebenfalls 100 Mio. GBP für CDR-Konzepte, einschließlich DAC, bereitgestellt. Finanzierungsprogramme zur Unterstützung der Entwicklung und Einführung von DAC wurden in Australien, Kanada, Europa und anderen Regionen initiiert.

Neben dieser Investitionsförderung ist der international bedeutendste Anreiz für DACS die Steuergutschrift 45Q der US-Regierung (mit 180 USD/tCO₂).

Um die Skalierung und die damit verbundenen Kostensenkungseffekte zu erreichen, benötigt DACS jedoch marktbasierte Lösungen. Climeworks und andere DACS-Firmen profitieren derzeit von freiwilligen Vereinbarungen über den Kauf auf dem Vorleistungsmarkt, die eine entsprechende Nachfrage nach ihren Gutschriften in den nächsten Jahren (in einigen Fällen bis zu 8 Jahren) sichern, doch muss auch hier eine breitere Nachfrage von Käufern nach Gutschriften folgen, die nach wie vor deutlich über dem Niveau anderer Emissionsminderungskategorien liegen.

Letztendlich müssen die Kosten für DACS erheblich sinken, selbst wenn die Preise für CO₂ und die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte steigen und könnten dann allenfalls die Nachfrage decken. Dazu können internationale Transaktionen (im Rahmen von Artikel 6 des Pariser Abkommens) oder Emissionshandelssysteme wie das Schweizer EHS und das EU-EHS, mit dem es verbunden ist, gehören. Der EU-Rahmen für die Zertifizierung der CO₂-Entfernung könnte letztendlich einen Weg bieten, damit DACS-Gutschriften gegen ETS-Zertifikate gehandelt werden können. Dies würde - sobald die Kosten den Preisen der gehandelten Zertifikate entsprechen - eine sehr große Nachfrage freisetzen, die der Größenordnung entspricht, die DACS in einigen Projektionen voraussichtlich erreichen wird.

2.5.9 Bilanzierung

Zwar gibt es bisher keine spezifische Sektor-Kategorie für die Anrechnung der negativen Emissionen von DACS, doch gibt es gemäss IPCC-Leitlinien die Möglichkeit Unterkategorien für verschiedene Maßnahmen in ihre Treibhausgasinventare aufzunehmen. In Ermangelung spezifischerer Leitlinien für DACS steht es den Ländern frei, über Emissionen und Senken zu berichten, wie es ihnen am sinnvollsten erscheint. So können sie z.B. negative CO₂ Emissionen in der Industrie durch DAC melden und die Intention es direkt zu speichern. Für die Berichterstattung über die entsprechende CO₂ - Speicherung gelten dieselben Leitlinien wie für konventionelles CCS (Abscheidung an Punktquellen) (Eggelston et al. 2006, Chapter 5).

Im Kontext der Kohlenstoffmärkte werden aktuell mehrere MRV Methodiken entwickelt: Der Voluntary Carbon Standard (VCS) nimmt ein DACS-spezifisches Modul als Teil des von der CCS+-Initiative entwickelten Modularen Baseline- und MRV-Systems an. Climeworks arbeitet auch an der Einbindung in den Puro Earth-Standard. Beide Standards bieten die Möglichkeit, Projekte für freiwillige

Kohlenstoffmarkt-Transaktionen zu ermöglichen. Interesse besteht ausserdem daran DACS-Projekte in die Kohlenstoffmärkte des Pariser Abkommens einzubeziehen und damit Transaktionen zwischen zwei Ländern im Hinblick auf ihre jeweiligen national festgelegten Beiträge (NDC) zu ermöglichen: Die Firma Perspectives unterstützt Climeworks mit dem Ziel, qualitativ hochwertige bilaterale Transaktionen unter Artikel 6.2 des Abkommens zu erproben. Diese Bemühungen können auch für den zentralisierten Artikel 6.4 Mechanismus unter der Aufsicht der UN angepasst werden.

2.5.10 Offene Fragen

Zu den technologischen Aspekten:

- Kann DAC wirklich mit CO₂ Bindung durch Pflanzen konkurrieren oder sind diese nicht immer effizienter, da es grosse Co-Benefits geben kann? Gibt es Algen, Pilze, Hefen oder Bakterien, die DAC deutlich effizienter und günstiger umsetzen und noch zusätzlichen Nutzen haben?

Zu Risiken, Nutzen, Kosten, Potenzialen und deren Einflussfaktoren:

- Was genau wird die Kosten für DAC in Zukunft senken, die Skalierung der Produktion?

Über Akteure, Politik und Rechnungslegung:

- Wie kann sichergestellt werden, dass der von DAC verwendete Strom aus erneuerbaren Energien stammt, wenn Strom aus dem Netz verwendet wird?

2.6 CO₂ Transport

2.6.1 Allgemeine Beschreibung

Der Transport von CO₂ kann per LKW, Zug, Binnenschiff, Schiff und Pipeline erfolgen. Um die Kosten abzuschätzen, wurden im Rahmen eines anderen grossen Schweizer Projekts, DemoUpCarma⁵⁵, detaillierte Studien durchgeführt. Für Mengen von über rund 1 Mio. t CO₂ pro Jahr wird der Transport über Pipelines als am kostengünstigsten angesehen (Becattini et al. 2022) und wird im Mittelpunkt des DeCIRRA-Projekts stehen. Allerdings gibt es in der Schweiz noch keine Vorschriften für CO₂ Pipelines und die Verantwortung für den Bau einer solchen Infrastruktur läge derzeit bei den Kantonen.

Derzeit gibt es nur sehr wenige in Betrieb befindliche CO₂-Pipelines, meist in den USA oder Kanada. In den USA gibt es etwa 7000 km CO₂-Pipelines, die meist zur verbesserten Ölgewinnung dienen. Das Sleipner-Gasfeld in Norwegen, Europas größter geologischer Speicher mit dem Namen "Northern Lights", wird nach seiner Eröffnung Mitte 2024 ausschließlich durch Schiffstransport beliefert.

Eine Option für die Schweiz wäre die Wiederverwendung der alten, seit 2015 ungenutzten Ölpipeline (E50), die sich an der alten Tamoil-Raffinerie in Monthey befindet und in San Nazzaro (Italien) an der Raffinerie endet. Ohne zusätzliche Modifikation beträgt die Kapazität der bestehenden Pipeline 400-500 ktCO₂/y. Mit einer Erweiterung (zusätzliche Kompressionsstation und Verdoppelung der Pipeline) kann sie 2,5 MtCO₂ /Jahr erreichen. Da es wenig Erfahrung mit der Nachrüstung von Pipelines gibt, könnte dies eine Herausforderung sein. Eine zusätzliche Pipeline wäre dann noch erforderlich, um eine mögliche Speicherstätte in Ravenna zu erreichen. Bis jetzt scheint es aber eher so zu sein, dass Italien kein CO₂ aus der Schweiz importieren möchte und also für diese Option diplomatische Bemühungen auf Regierungsebene erforderlich sind. Außerdem gibt es in Genua kein CO₂ -Terminal und ein Teilabschnitt wäre für CO₂ nutzbar, so dass eine neue Pipeline für die letzten 25% nach Genua erforderlich wäre. Innerhalb der Schweiz ist Collombey weit von den Hauptemittenten (Zementwerke und Müllverbrennungsanlagen) entfernt, was zusätzliche Pipelines erfordert (Nick und Thalmann 2021).

Open Grid Europe (OGE), ein deutscher Transportnetzbetreiber für Gaspipelines, plant ein CO₂ Netz in Deutschland, das deutsche Emittenten mit Häfen an der Nordsee verbindet. Das Netz sieht auch eine Verbindung zur Schweiz in Wallbach vor, einem deutsch-schweizerischen Knotenpunkt von Gasleitungen. Für die Lage der Pipeline ist der direkte Anschluss der grössten Anlagen der Zementindustrie und Müllverbrennung wichtig, da diese die grössten Emittenten in der Schweiz sind.

2.6.2 Risiken

Der Transport von CO₂ hat keine positiven ökologischen Nebeneffekte. Deshalb werden hier nur die Risiken benannt. Es bestehen Risiken durch Leckagen:

- Das kann zur Verunreinigung des Trinkwassers führen. Dieses Risiko wurde auch im Zusammenhang mit dem Projekt Cargo-Sous-Terrain angesprochen. Es könnte daher auch für eine CO₂-Pipeline relevant sein.
- Wenn sich CO₂ in Senken sammelt, dann kann es für Menschen und Tiere tödlich sein, vor allem da es unsichtbar und geruchslos ist.

Da wir für den Transport von anderen (Nachbar-)Ländern abhängig sind, besteht das Risiko, dass es hier keine Einigung über die Anschlussstellen gibt oder dass es zu Verzögerungen beim Bau kommt. Es kann auch das Risiko langwieriger Verhandlungen bestehen, da geklärt werden muss, wer für den Teil der CO₂ -Pipeline aufkommt, der ausschließlich für die Verbindung mit dem anderen Land benötigt wird.

⁵⁵ <http://www.demoupcarma.ethz.ch/en/home/>

2.6.3 Systemgrenzen, Kosten, Potenzial und der wichtigsten Treiber

Die Systemgrenzen für die Quantifizierung von THG-Emissionen und anderen Umweltbelastungen, die mit dem Transport von CO₂ verbunden sind, also z.B. zwischen Punktquellen, wo CO₂ abgeschieden wird, bis zu den geologischen Speicherstätten, umfassen den Bau/die Herstellung der Infrastruktur für den Transport (z. B. Pipelines, Lastwagen), den Betrieb der Transportinfrastruktur mit Emissionen aufgrund von z.B. CO₂-Leckagen und Kraftstoffverbrennung und THG-Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen sowie die End-of-Life-Behandlung der Infrastruktur mit den damit verbundenen Belastungen.

SAIPEM hat im Auftrag des VBSA eine konzeptionelle Planungsstudie für eine CO₂ Pipeline in der Schweiz im Jahr 2020 durchgeführt (SAIPEM 2020). Die Studie konzentrierte sich auf eine Sammel-CO₂ Pipeline für 32 grössere Schweizer CO₂ Emittenten und beinhaltet kein Transportvolumen. Die vorgeschlagene Pipeline wurde mit einer Gesamtlänge von 1032 km mit zwei Haupttrassen (Ost und West) geplant und würde eng dem bestehenden Erdgasleitungskorridor folgen (siehe Abbildung 27). Es wurde zwischen Gas (Maximaler Betriebsdruck = MOP = 35 barg) und dichter Phase (MOP = 145 barg) unterschieden.

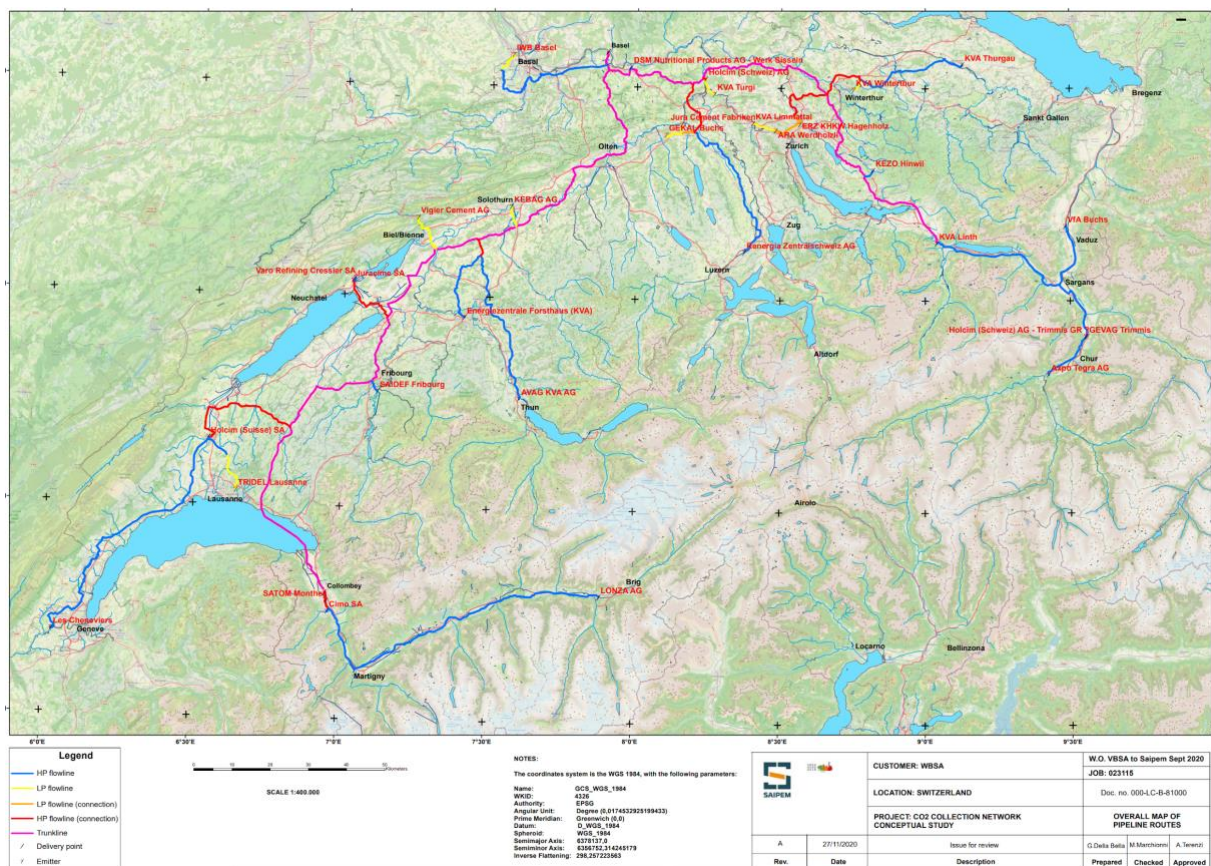


Abbildung 27: CO₂-Netzwerk Karte (SAIPEM 2020)

Die Kapitalinvestitionskosten (CAPEX) und die Betriebs- und Wartungskosten (OPEX) wurden für die Pipeline einschließlich der erforderlichen Kompressionsanlagen und der Energie für deren Betrieb geschätzt. Die erforderlichen CAPEX werden auf 2,8 bis 3,2 Mrd. EUR und die Betriebskosten auf etwa 200 Mio. EUR pro Jahr geschätzt. Bezogen auf die zu erwartenden Förder- und Transportmengen entspricht dies etwa 35 EUR/t CO₂.

Tabelle 10: Schätzung für die CO₂ Pipeline (SAIPEM 2020)

Euro	Gas (MOP = 35 barg)		Total	Dicht (MOP = 145 barg)		Total
	Pipeline	Kompressions-einheiten		Pipeline	Kompressions-einheiten	
CAPEX	1.8	0.9 + 0.4	3.2 Mrd.	1.2	1.5 + 0.08	2.8 Mrd.
OPEX	26.5	113 + 59	199 Mio.	18.5	175 + 5	199 Mio.

Nach einer neueren Studie von BAK economic intelligence in Kooperation mit der DENA im Auftrag des BAFU (Albicker et al. 2023) belaufen sich die ermittelten Gesamtkosten des CCS-Systems auf 16.3 Mrd. CHF, wobei hier die Kosten der Abscheidung mit 56% dominieren und die mit den Infrastrukturinvestitionen verbundene Transportkosten per Pipeline im Inland nur 30% ausmachen. Die Bandbreite der geschätzten Gesamtkosten liegt zwischen 11.2 und 21.4 Mrd. CHF. Dass die Abscheidungskosten wesentlich höher als die Transportkosten geschätzt werden ist neu im Vergleich zu den meisten Modellannahmen. Pro Tonne CO₂ Vermeidung (Abscheidung und Transport) werden im Basisszenario 180 CHF/tCO₂ geschätzt, welche stark davon abhängen wie schnell die Pipeline gebaut wird und wieviel CO₂ darin transportiert wird.

Folgende Rahmenbedingungen können die Kosten stark beeinflussen:

- Kann der Bau einer zweiten Pipeline im Rahmen bestehender Wegerechtsvereinbarungen erfolgen?
- Wer und wie wird die Infrastruktur finanziert?
- Nach welchen Betriebsmodellen wird die Pipeline gebaut und betrieben?

2.6.4 Relevante Akteure

Die wichtigsten Akteure wurden bereits im Abschnitt über BECCS erwähnt, da der Transport für alle großen CO₂ Emittenten wie KVA's, Zementwerke oder Heiz- und Stromerzeugungsanlagen, die mit Holz und anderen Brennstoffen betrieben werden, von Bedeutung ist.

Für den Transport spielen die Behörden eine sehr wichtige Rolle, da sie die Vorschriften für die Bewilligung und den Betrieb erlassen müssen und die Überwachungsfunktionen haben, z.B. das "**Eidgenössische Rohrleitungsinspektorat**"⁵⁶ für die technische Überwachung. Darüber hinaus werden die zuständigen kantonalen oder/und weiteren nationalen Behörden involviert sein. Weitere relevante Akteure sind der/die Betreiber der CO₂ Pipeline und deren Aktionäre.

In dieser Hinsicht ist die **Schweizer Gasindustrie** ein wichtiger Partner, da sie, wenn die fossilen Gaspipelines nicht mehr genutzt werden, ihr Fachwissen für die Dekarbonisierung nutzen kann, und auch **Swisstopo**, da beide den Schweizer Untergrund sehr gut kennen und Swisstopo Erfahrungen mit Pipelines hat.

Auch die Schifffahrt, Bahnunternehmen wie **ChemOil** (Tochtergesellschaft der SBB) und die LKW-/Logistikbranche werden sehr wichtige Partner sein, da kleinere Projekte und Pilotprojekte auf diese Art von Transport angewiesen sind.

Cargo Sous Terrain hat Erfahrung mit der Finanzierung und Planung großer Verkehrsinfrastrukturen, die auch einen Teil der CO₂ -Pipeline umfassen können.

International gibt es einige einschlägige Unternehmen, die Pipelines in den umliegenden Ländern planen und bauen, wie **TES**⁵⁷. In Europa, vor allem aber in Deutschland, treibt das private Unternehmen

⁵⁶ <https://www.svti.ch/en/federal-pipelines-inspectorate-fpi>

⁵⁷ <https://tes-h2.com/de>

TES den Bau eines Pipelinenetzes für den Transport von grünem H₂ in Form von Methan voran (Green Cycle). Damit die Nutzung von Methan CO₂-neutral ist, muss das CO₂ aus dem Methan abgeschieden, abtransportiert und wieder in neues synthetisches Methan umgewandelt werden (e-NG). Deshalb entwickeln TES (Tochterunternehmen) und **OGE** (Mutterkonzern) gemeinsam ein 1.000 Kilometer langes CO₂-Transportnetz in Deutschland, das den TES Green Energy Hub in Wilhelmshaven mit mehreren Industriestandorten verbindet, zu denen das CO₂ transportiert und anschließend sequestriert oder für die Produktion von e-NG wiederverwendet werden soll. Die strategisch wichtigen Standorte in der Schweiz, wie z.B. Basel, können per Bahn oder Pipelines an diese Infrastruktur angeschlossen werden. TES ist eine Partnerschaft mit Energie 360° und dem VBSA eingegangen. TES will Energie 360° ab 2027 mit jährlich rund einer TWh erneuerbarem synthetischem Methan (e-NG) beliefern. Im Gegenzug will Energie 360° TES mit erneuerbarem CO₂ beliefern.⁵⁸ Mit dem VBSA wurde eine Partnerschaft zur Dekarbonisierung von Müllverbrennungsanlagen in der Schweiz unterzeichnet, die jährlich rund 4 Millionen Tonnen CO₂ ausstoßen.⁵⁹

2.6.5 Nationale und internationale Politiken und Anreize

In der Schweiz

Rechtsgrundlage für CO₂-Verkehrsnachfrage

Die Schweiz hat eine langfristige Klimastrategie verabschiedet, die auf den Transport und die Speicherung bzw. Nutzung von CO₂ zum Teil im Inland, aber auch in erheblichem Umfang im Ausland setzt (da die Kapazitäten für die CO₂-Verwertung und -Speicherung im Inland sehr begrenzt sind). Das neue Bundesgesetz über Klimaschutzziele, Innovation und die Stärkung der Energieversorgungssicherheit (KIG)⁶⁰ sieht Fördermittel in der Höhe von 1,2 Milliarden Franken für Technologien für klimafreundliche Produktion und Prozesse vor, die auch für die CO₂-Infrastruktur eingesetzt werden könnten.

Die politische Planung in der Schweiz stützt sich auf die Projektionen und Szenarien der in Auftrag gegebenen Studie *Energieperspektiven 2050+*, die einen eigenen Band über negative Emissionen und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung enthält (Kemmler et al. 2021) in dem die Transportanforderungen und -kosten skizziert werden, ohne jedoch auf die rechtlichen und regulatorischen Aspekte einzugehen. Laut dieser Studie beläuft sich das zu erwartende Transportvolumen auf 7 Mio. Tonnen CO₂ jährlich (bis 2050), es sei denn, ein Teil des CO₂ kann direkt am Ort der Abscheidung gespeichert werden.

Rechtsgrundlage für national koordinierte Genehmigungen

Der Transport von CO₂ ist anders als der von Gas oder Öl, da der Wert von der Politik und nicht von der Nachfrage der Verbraucher abhängt. In Anbetracht der Notwendigkeit koordinierter Transportwege innerhalb der Schweiz und zur Verbindung mit Speicherstätten im Ausland (die oft vollständig durch Drittländer verlaufen) erscheint es selbstverständlich, dass der Bund ein viel stärkeres gesetzliches Mandat erhalten muss, um bei der Planung, Genehmigung und möglicherweise sogar bei der Durchsetzung (bei lokalen Konflikten mit Grundeigentümern) des öffentlichen Interesses an effizienten und nicht störenden Transportinfrastrukturen kritisch mitzuwirken. Pilotaktivitäten könnten jedoch möglicherweise bereits in Koordination zwischen kleinen Gruppen von Kantonen durchgeführt werden. Es könnte notwendig sein, eine Verfassungsänderung zu verabschieden, die den Bund mit dem Mandat ausstattet, CO₂ Pipelines und unterirdische Speicher zu genehmigen.

Während die derzeitige Rechtsgrundlage für den Leitungsbau den Kantonen die Verantwortung für die Erteilung von Einzelgenehmigungen überträgt, ist die Rechtsgrundlage für die Bundesplanung des

⁵⁸ <https://tes-h2.com/de/news/energie-360-und-tes-schliessen-partnerschaft-um-gruene-energie-an-industrie-zu-liefern>

⁵⁹ <https://tes-h2.com/de/news/tes-und-vbsa-unterzeichnen-partnerschaft-zur-dekarbonisierung-von-kehrichverwertungsanlagen-in>

⁶⁰ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2022/2403/de>

unterirdischen Verkehrs viel stärker. Die Idee von Cargo Sous Terrain stützt sich auf Art. 81 der Bundesverfassung⁶¹ die Vision eines unterirdischen Schienentransports in Kombination mit der Möglichkeit des Gastransports über Pipelines.

Um den Bau von Pipelines zu genehmigen, könnte das Gesetz für besondere öffentliche Bauvorhaben genutzt werden, das es ermöglicht, die gesamte Genehmigungsbefugnis in die Hände der Bundesregierung zu legen. Dieses Gesetz enthält jedoch keine Befugnis zur Enteignung von Privateigentum, was sich in der Praxis als erhebliches Hindernis erweisen könnte. Das Recht, für den Bau einer Pipeline auf privatem Grund und Boden Enteignung zu verlangen, könnte im Prinzip durch eine Gesetzesänderung angestrebt werden. In der Praxis würden solche Ansprüche jedoch auf Herausforderungen stoßen, da klar sein müsste, dass der Bau im öffentlichen Interesse liegt und nicht nur im Interesse eines Unternehmens, das eine Pipeline baut und/oder betreibt: Es müsste ein kausaler Zusammenhang zwischen dem öffentlichen Interesse und dem gewählten Pipelinepfad nachgewiesen werden. Andererseits ist es wahrscheinlich, dass CO₂ Transportpipelines - so weit wie möglich - dem Verlauf bestehender Gaspipelines folgen müssten, was die Planungs- und Genehmigungsverfahren erheblich erleichtern und Probleme mit dem Grundeigentum begrenzen könnte. Die rechtlichen Genehmigungen müssen vom ERI/BFE erörtert und geplant werden; derzeit sind die Regeln und Spezifikationen noch unklar.

Rechtsform der Verkehrsanbieter und Finanzierungsmöglichkeiten

In der Schweiz gibt es mehrere potenzielle Rechtsformen von Einrichtungen, die CO₂ -Transportdienstleistungen für Aktivitäten zur Kohlenstoffabscheidung, -transport und -speicherung anbieten könnten. Eine Option ist wie bei der **traditionellen Beschaffung** eine reine **öffentliche Finanzierung**, bei der der Bund und/oder die Kantone/Städte öffentliche Mittel bereitstellen und die alleinigen Eigentümer der Infrastruktur werden. Sie finanzieren die Planung und den Bau der Infrastruktur durch öffentliche Schulden. Um dem öffentlichen Dienstleistungserbringer eine gewisse Autonomie zu geben, können spezielle öffentliche Stellen eingerichtet werden. Diese Körperschaften können verschiedene Formen annehmen, wie autonome öffentliche Einrichtungen (z. B. der Flughafen Genf), öffentlich-rechtliche Aktiengesellschaften (z. B. die Schweizerischen Bundesbahnen und die Schweizerische Post) oder sogar privatrechtliche Einrichtungen (z.B. die Flugsicherung Skyguide) (siehe Tabelle 11).

Eine weitere mögliche Option ist die private Finanzierung, bei der die CO₂ Verkehrsinfrastruktur **rein privat finanziert wird** und in **privatem** Besitz ist. In diesem Fall hat das private Unternehmen die Befugnis, die Preise für die Nutzung der Infrastruktur festzulegen. Der Staat kann das mit der privaten Finanzierung verbundene Risiko durch Garantien verringern, wie in Artikel 7 des Klima- und Innovationsgesetzes (Schweizerische Eidgenossenschaft 2022). Es gibt zwei verschiedene Formen der privaten Finanzierung: die Projektfinanzierung und die Unternehmensfinanzierung. Bei der Projektfinanzierung wird ein separates Unternehmen, eine Zweckgesellschaft (Special Purpose Vehicle, SPV), ausschließlich für den Bau des Projekts gegründet, das nicht in der Bilanz des Unternehmens ausgewiesen wird. Bei der Unternehmensfinanzierung hingegen wird das Projekt als Teil eines bestehenden Unternehmens entwickelt, und alle Gewinne oder Verluste werden in der Bilanz des Unternehmens ausgewiesen.

Eine weitere Möglichkeit ist die regulierte private Finanzierung, bei der privates Eigentum und Investitionen in Infrastrukturanlagen mit den zugrunde liegenden Vorschriften und Anreizen institutioneller Akteure kombiniert werden. In diesem Szenario fungiert ein privates Unternehmen als Infrastrukturbetreiber und erhebt Transitgebühren und/oder Subventionen zur Finanzierung des Betriebs und zur Deckung der Investitionskosten. Ein Ansatz für eine regulierte private Finanzierung ist das Modell der **regulierten Anlagen**, bei dem der Infrastrukturbetreiber im Rahmen einer Regulierung tätig ist, um den Marktzugang, faire Preisbildungsmechanismen und die Entflechtung sicherzustellen. Als Gegenleistung für die Einhaltung dieser Vorschriften übernimmt der öffentliche Wirtschaftsregulator die kommerziellen Risiken und garantiert eine angemessene und stabile Rendite für die

⁶¹ "Der Bund kann im Interesse des ganzen Landes oder eines grossen Teils desselben öffentliche Bauvorhaben ausführen und betreiben oder solche Bauvorhaben unterstützen".

Anlageninvestition. So werden beispielsweise die von Swisscom verwalteten Stromnetze unter der Aufsicht der Elcom reguliert.

Schließlich bieten **öffentlich-private Partnerschaften (ÖPP oder PPP)** eine alternative Rechtsform für CO₂-Verkehrsdienstleister. ÖPPs sind langfristige Vereinbarungen zwischen einer öffentlichen Behörde und einem privaten Partner, der im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens ausgewählt wird, um die für die Erbringung öffentlicher Dienstleistungen erforderliche Infrastruktur zu planen, zu bauen, zu finanzieren und zu betreiben. Bei dieser Vereinbarung ist ein und derselbe private Partner an allen Aspekten beteiligt, einschließlich Planung, Bau, Finanzierung und Betrieb oder Instandhaltung. Beispiele für PPP-Projekte in der Schweiz sind die Nagra, die ein Endlager für nukleare Abfälle verwaltet, das Neumatt-Zentrum in Bern (einschließlich eines Gefängnisses) und das Fernwärmesystem in Genf (Cadiom). Bei diesen Partnerschaften werden öffentliche und private Ressourcen, Fachwissen und Verantwortlichkeiten kombiniert, um die Ziele der Infrastrukturentwicklung und Dienstleistungserbringung zu erreichen.

*Tabelle 11: Mögliche Varianten der Organisation und Finanzierung der CO₂ Pipeline
(angepasst von Athias et al. 2019)*

	Design	Bau	Finanzierung	Betrieb	Eigentümer-schaft	Beispiele	Vorteile	Nachteile
Traditionelle Beschaffung	Öffentlich	Privat	Öffentlich	Öffentlich	Öffentlich	- Autonome öffentliche Einrichtungen (Flughafen Genf) - Öffentlich-rechtliche Aktiengesellschaft (SBB) - Privatrecht (Skyguide)	Geringere Finanzierungskosten im Vergleich zum Privatsektor	- Referendumsrisiko - Finanzierung über das Budget
Private Finanzierung	Öffentlich (oder gemischt)	Privat	Privat	Öffentlich (oder gemischt)	Öffentlich	Eindeutiges und dauerhaftes Erbpachtrecht (Tissot Arena)	- Referendum vermeiden - Kein öffentlicher Haushalt - Breitere Verteilung der Kosten (Grössenvorteile)	
Dienstleistungsaufträge	Öffentlich	Privat	Öffentlich	Privat (≠ Bau)	Öffentlich	- Pachtverträge, die von den Nutzern bezahlt werden (z. B. Kinderbetreuungseinrichtungen) - Verwaltungsvertrag (Festpreis der öffentlichen Hand)		
öffentlich-private Partnerschaft (gleicher private Partner für Bau und Betrieb)	Privat (oder gemischt)	Privat	Privat (oder gemischt)	Privat	Öffentlich	- Verfügbarkeitsmodell: Festpreis, Nachfragerisiko bei der öffentlichen Hand (Verwaltungszentrum Neumatt) - Konzessionsmodell: Nachfragerisiko beim Anbieter (Fernwärmenetz Cadiom)	Bessere Qualität, da der Bauherr auch der Betreiber ist	- Es fehlen Fähigkeiten - Kann komplex werden - Ungünstige Auswahl (z.B. Fluch des Gewinners im Bieterverfahren) - Kein spezifischer rechtlicher und institutioneller Rahmen für ÖPP auf Bundesebene
Regulierter Markt	Privat	Privat	Privat	Privat	Privat	Aufgrund von Bundes-, Kantons- oder Gemeindegesetzgebung (z.B. Pflegeheime)		

Ein wichtiger Aspekt bei der Finanzierung ist das Geschäftsmodell. Ein Problem bei der Finanzierung einer CO₂-Pipeline wird sein, dass das Netz bereits von Anfang an unter Berücksichtigung des Transportbedarfs für künftige Nachfragespitzen aufgebaut werden muss. Daher wären die spezifischen Kosten für die ersten Transportkunden zu hoch und für diese uninteressant. In Deutschland gibt es Diskussionen in der Richtung, dass die "CO₂ Transportgesellschaft" (CO₂ TSO) die gesamte Pipeline baut und von den Transportkunden ein bezahlbares Nutzungsentgelt erhält. Im Laufe der Jahre werden immer mehr Kunden den Transport nutzen. Nach einer gewissen Zeit (z.B. 10 Jahre) wird neu kalkuliert, ob die Preise so gestaltet werden können, dass der CO₂ TSO alle Kosten decken kann. Sollte dies nicht möglich sein, würde das Defizit durch den Staat gedeckt werden. Es ist sinnvoll, diese Diskussion zu verfolgen, um zu sehen, ob dies auch für die Schweiz eine Lösung sein könnte.

International

International gibt es keine Beispiele für eine umfassende Regulierung des CO₂-Transports in großem Maßstab. In den USA gibt es seit langem problematische Genehmigungsverfahren für Gaspipelines, und die Genehmigungsverfahren für den CO₂-Transport, die im Zusammenhang mit den regionalen DAC-Drehkreuzen eingeleitet wurden, scheinen die gleichen Probleme zu haben.

In Deutschland hat Open Grid Europe (OGE) ein internes Projekt zur Ausarbeitung eines Spezifikationsrahmens ins Leben gerufen, der die Grundlage für ein Regulierungs-/Genehmigungsverfahren bilden kann. Es ist vorgesehen, dass ein Austausch zwischen ihnen und technischen Experten aus der Schweiz, einschließlich des ERI (Eidgenössisches Rohrleitungsinspektorat), stattfindet.

Sektorenkopplung und kartellrechtliche Herausforderungen

Wenn es um die Zusammenarbeit zwischen mehreren Sektoren geht, kann sich der CO₂-Transport in Europa als besonders schwierig erweisen, da es keinen direkten internationalen Stand der Technik für die Sektorkopplung gibt, was ein weitgehend ungelöstes internationales Problem ist. In der Europäischen Union wurden die bestehenden sektorspezifischen Verordnungen als unzureichend angesehen, um Technologien zur Sektorkopplung zu berücksichtigen (Gea-Bermúdez et al. 2021). Die Klärung des Geltungsbereichs einzelner Teile und Institutionen in komplexen Wertschöpfungsketten über mehrere Sektoren hinweg kann mit zunehmendem Umfang und verstärkter Kooperation schwierig werden (wie es bei Speicher- und Verwertungshubs und Clustern der Fall wäre, insbesondere wenn diese dauerhaft durch Pipelines verbunden sind). Es ist möglich, dass weitere Analysen zeigen werden, dass die gesetzlichen Bestimmungen zur Sektorkopplung und zum Kartellrecht geändert werden müssen, um eine glaubwürdige und wirksame Umsetzung solcher Fälle zu ermöglichen. Entflechtungsvorschriften, die in der Regel für Strom- oder Gasnetzbetreiber gelten (Tanase und Herrera Anchustegui 2023), könnten auch für CO₂-Leitungsbetreiber gelten und sich im Falle von Infrastrukturen, die zu einer physischen Kopplung von Sektoren und Akteuren führen, als problematisch erweisen. Ziel weiterer Analysen müsste es daher sein, potenzielle Probleme zu ermitteln und regulatorische Anpassungen vorzuschlagen, die gleiche Wettbewerbsbedingungen fördern und sicherstellen, dass die innovativsten, nützlichsten und effizientesten Technologien gedeihen und zum Kohlenstoffmanagement beitragen können.

Klassifizierung von CO₂

Die Unklarheit über die richtige Einstufung von CO₂ - handelt es sich um Abfall oder ein Produkt - für den Transport zur Lagerung im Ausland hat sich im Rahmen des DemoUpCarma-Projekts als ernsthafte rechtliche Herausforderung erwiesen.⁶² Ein Problem bestand darin, dass der erste Container mit CO₂, der in einem isländischen Hafen ankam, zurückgewiesen wurde, weil er nicht ordnungsgemäß deklariert war und weil es Vorschriften gegen die Entsorgung ausländischer Abfälle im Lande gibt. Die Einfuhr konnte dann nach Vorlage eines Ursprungszeugnisses erfolgen. Später zeigte sich auf Schweizer Seite eine andere Hürde, die ebenfalls die richtige Einstufung des CO₂ - als chemisches Gut oder als Abfall - betraf. Der internationale Transport von CO₂ zur Lagerung im Ausland ist also in Frage gestellt, solange kein einheitlicher Ansatz gefunden wird, der solche Aktivitäten generell oder unter bestimmten Bedingungen zulässt; unterschiedliche nationale Rechtsvorschriften sind eine weitere Herausforderung, die in jeder Kombination von zwei Ländern, zwischen denen solche Transporte stattfinden sollen, unterschiedlich sein können. Eine ordnungsgemäße Klassifizierung ist notwendig, um die Einhaltung von Umwelt-, Sicherheits- und Transportvorschriften zu gewährleisten und Haftungsfragen im Zusammenhang mit dem Umgang und der Lagerung von CO₂. Jede Leckage während des Transports in internationalen Gewässern müsste im Rahmen der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) wie eine Emission behandelt werden.

Uneinheitliche Umsetzung der EU-CCS-Richtlinie

Die uneinheitliche Umsetzung der EU-CCS-Richtlinie in den verschiedenen Mitgliedsstaaten und Staaten des Europäischen Wirtschaftsraums wirft erhebliche Probleme auf (Elkerbout und Bryhn 2019).

⁶² Siehe die Projekt-Website: <http://www.demoupcarma.ethz.ch/>

Ziel der EU-CCS-Richtlinie ist es, einen Rechtsrahmen für die sichere und umweltverträgliche Abscheidung, den Transport und die Speicherung von Kohlendioxid zu schaffen. Die Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht ist jedoch von Land zu Land unterschiedlich, was zu regulatorischen Unterschieden und potenziellen Hindernissen für die Durchführung von Projekten zur Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CCS) führt. Eine uneinheitliche Umsetzung kann zu Unterschieden bei Genehmigungsverfahren, Haftungsregeln und regulatorischen Anforderungen führen, die Unsicherheit schaffen und die grenzüberschreitende Zusammenarbeit bei CCS-Initiativen behindern. Dieser Mangel an Harmonisierung untergräbt die Effektivität und Effizienz der CCS-Einführung, da er den Verwaltungsaufwand erhöht, die Projektplanung und -finanzierung erschwert und von Investitionen in diese wichtige Klimaschutztechnologie abhalten kann. Die Beseitigung dieser Unstimmigkeiten und die Förderung einer harmonisierten Umsetzung der CCS-Richtlinie der EU sind von entscheidender Bedeutung für die Förderung eines koordinierten und kohärenten Ansatzes zur Umsetzung von CCS in der Europäischen Union und im Europäischen Wirtschaftsraum. Für die vollständige Kompatibilität und den Anschluss der Schweiz an die europäischen Pipeline- und Speicherinfrastrukturen ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Schweiz ihren Rechtsrahmen vollständig an den der EU-CCS-Richtlinie anpasst, was die Abscheidung und den Transport von CO₂ (Frattini et al. 2022).

Regulatorische und industrielle Standardisierung

Für die Interoperabilität aller Formen des CO₂ Transports sind Fortschritte bei der Standardisierung von Gasdrücken, Reinheit und mechanischen Verbindungspunkten sowie bei der Volumendosierung erforderlich, um ein reibungsloses Zusammenspiel zu erreichen (Neerup et al. 2022). Das Gleiche gilt für die Sicherheitsstandards, wo bereits Fachwissen vorhanden ist und wo es Vorschriften gibt, z. B. für Binnenschiffe - das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen - kurz AND - auch für die Binnenschifffahrt von CO₂ (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 2018).

Es besteht ein Bedarf an einer Standardisierung, die eine Kompatibilität zwischen den CO₂ Transportelementen in Europa erreicht. Eine fehlende Harmonisierung behindert grenzüberschreitende Aktivitäten und schafft zusätzliche Unsicherheit in einem Sektor, der bereits als hochriskant für Investitionen gilt (Neele et al. 2013). Die Normung ist unerlässlich, um eine einheitliche Produktqualität und sichere Transportbedingungen zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk sollte auf die Auslegung von Pipelines und die Kontrolle von Brüchen auf der Grundlage von Nachweisen gelegt werden.

Nationale und lokale Unterschiede in den Vorschriften können die Planung des CO₂ Transports erheblich erschweren. Lokale Vorschriften, vor allem in ökologisch sensiblen Gebieten, können zum Beispiel besondere Konstruktionsentscheidungen für Flussüberquerungen erfordern (van den Broek et al. 2013). In solchen Fällen werden häufig grabenlose Methoden wie HDD (Horizontal Directional Drilling) oder Microtunneling eingesetzt (Ziaja et al. 2018). In anderen Fällen können unter ähnlichen Umständen lokale Vorschriften für eine Brückenquerung zulässig sein. Solche unterschiedlichen Vorschriften erhöhen die Komplexität des Planungsprozesses und erfordern eine sorgfältige Einhaltung der lokalen Anforderungen.

Im Hinblick auf gleiche Wettbewerbsbedingungen kann ein Ungleichgewicht zwischen unterstützenden und restriktiven Maßnahmen für Schweizer Unternehmen problematisch werden, wenn die Schweiz ähnliche Umweltschutzvorschriften wie die EU erlässt, die dem Privatsektor Kosten aufbürden, aber nicht die gleichen unterstützenden und schützenden Maßnahmen wie die EU ergreift. Dazu gehören ein Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus sowie verschiedene Subventionen und bevorzugte Investitionsfonds (Holzer 2021). Um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten, muss die Schweiz möglicherweise auch die unterstützenden Maßnahmen stärker an die der EU angleichen.

EU-Projekte von gemeinsamem Interesse

EU-Projekte von gemeinsamem Interesse (PCI gemäß der TEN-E-Verordnung der EU, siehe EU (2022)) bieten bedeutende Möglichkeiten für die Entwicklung von CO₂ Transportpipelines und anderen CO₂ Transportinfrastrukturen. Diese Infrastrukturprojekte dienen der Verbindung der Energiesysteme der EU-Länder und erleichtern den effizienten und sicheren Transport von CO₂. PCIs kommen für eine Finanzierung durch die europäische Fazilität Connecting Europe (CEF) in Frage, die finanzielle

Unterstützung für ihre Umsetzung bietet. Darüber hinaus profitieren PCIs von beschleunigten Genehmigungs- und Zulassungsverfahren, die die Entwicklung und den Aufbau der CO₂ Transportinfrastruktur rationalisieren.

EU-Innovationsfonds

Der Innovationsfonds ist ein Finanzinstrument im Rahmen des Emissionshandelssystems der Europäischen Union, mit dem neuartige Projekte, einschließlich CO₂ Verkehrsinfrastrukturinitiativen, ermöglicht werden können. Er stellt umfangreiche Mittel zur Verfügung, um die Demonstration und den Einsatz innovativer kohlenstoffarmer Technologien zu unterstützen und so die Verbreitung von Technologien und die Verwirklichung ehrgeiziger Klimaziele zu fördern.

2.7 CO₂ Speicherung

2.7.1 Allgemeine Beschreibung

Viele der oben beschriebenen technischen NET Ansätze wie BECCS und DACCS werden nur zu negativen Emissionen führen, wenn das abgeschiedene oder gefilterte CO₂ permanent eingelagert werden kann. Investitionen in diese Technologien hängen also massgeblich davon ab, ob das letzte Glied in der Wertschöpfungskette, die Speicherung des CO₂, gesichert ist. Wie der Stand zu diesem Thema derzeit ist und welche Einlagerungsoptionen existieren, wie hoch das Potential dafür weltweit und in der Schweiz geschätzt wird, soll in diesem Kapitel erläutert werden.

Laut IPCC (2005) bestehen sechs verschiedene geologische Speicheroptionen (siehe Abbildung 28), in unterschiedlichen Tiefen, wobei meist die Speicheroptionen sowohl zu Land und unter Wasser zur Verfügung stehen:

1. Ausgediente Gas- und Ölfelder
2. Nutzung um Erdgas- oder Ölfelder weiter auszubeuten
3. Tiefe ungenutzte Saline mit wassergesättigtem Speichergestein
4. Tiefe nicht erschliessbare Kohleflöze
5. Nutzung von CO₂ zur Methan-Rückgewinnung von Kohleflözen
6. Andere Speichergesteine wie Basalt, Ölschiefer und andere Hohlräume.

Informationen über CO₂ Speicherstätten in der Schweiz basieren zum einen auf Informationen von Bohrungen zu Geothermie oder zu Endlager des Nuklearen Abfalls der NAGRA. Die Schweiz verfügt nur über ein ausgedientes Erdgasfeld (Finsterwald, Entlebuch) und keine Erdölfelder und die Kohleflöze werden aus finanziellen Gründen nicht genutzt. Es bleiben daher vor allem die dritte und sechste Variante als Speicheroption übrig, das heisst die Speicherung in salinen Aquiferen und die Nutzung von anderem Speichergestein. Laut einer Studie von Driesner et al. (2021) befindet sich in Treyconvagnes, in der Nähe des Zementwerks von Holcim (Standort Eclépens), eine potentielle CO₂ Speicherstätte.

Aufgrund der chemischen Eigenschaften von CO₂ (die Dichte ist stark von Temperatur und Druck abhängig) ist eine Speicherung erst ab rund 800 m unter der Erde sinnvoll, da dort das Volumen stark abnimmt und deutlich mehr CO₂ gespeichert werden kann (Präsentation von Christophe Nussbaum von swisstopo in Disentis).

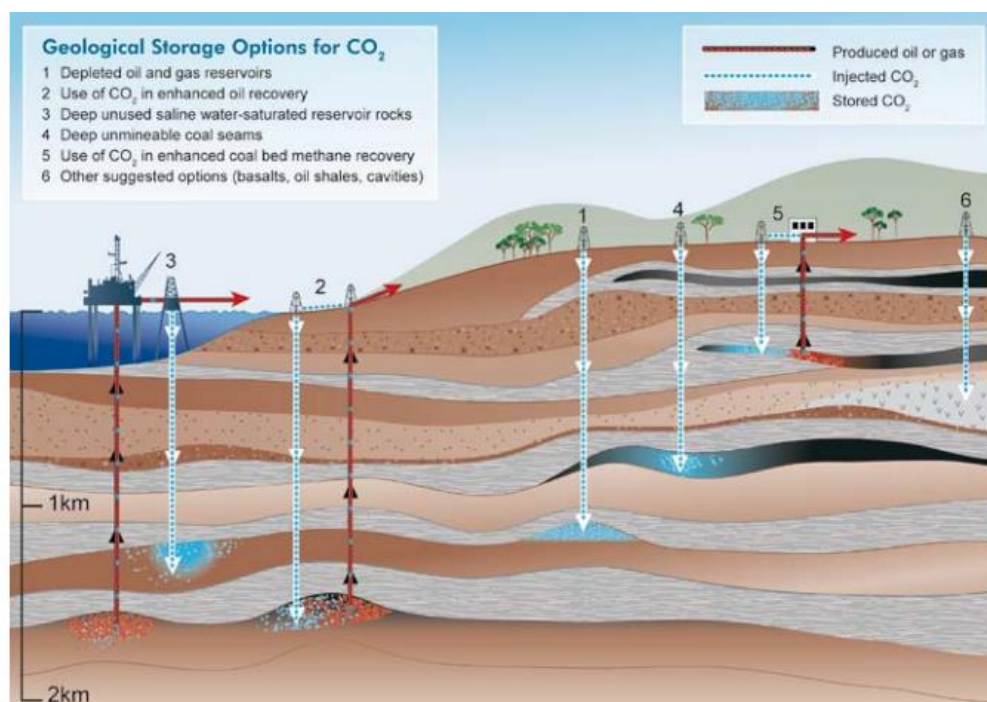


Abbildung 28: Optionen für die Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2005)

Im Schweizer Mittelland sind laut swisstopo 7 Kombinationen von möglichem Speichergestein mit darüber liegendem (dichtem) Deckgestein verfügbar:

1. Obere Meeresmolasse (OMM) Sandsteine / Obere Süsswassermolasse (OSM) Mergel
2. Oberer Malm – Untere Kreide Kalk / Untere Süsswassermolasse (USM) Mergel
3. Hauptrogenstein Kalk / Effingen Member Kalkmergel
4. Sandsteinkeuper, Arietenkalk Kalk / Lias, Opalinuston
5. Oberer Muschelkalk/ Gipskeuper Evaporite
6. Buntsandstein und geklüftetes Kristallin (nicht sedimentär) Basement / Anhydrit Gruppe Evaporite
7. Permokarbon-Trog Sandsteine / permische Schiefer oder Anhydrit-Gruppe Evaporite.

2.7.2 Systemgrenzen, Stoff- und Emissionsströme und Treiber

Zu den Systemgrenzen für die Quantifizierung von Treibhausgasemissionen und anderen Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der geologischen Speicherung von Kohlendioxid gehören die Infrastruktur an der Injektionsstelle über und unter der Erde, die Energieversorgung für die CO₂-Injektion, potenzielle Überwachungssysteme und gegebenenfalls kurz- und langfristige CO₂-Emissionen während des Speicherprozesses.

2.7.3 Co-Benefits

Der einzige derzeit bekannte Co-Benefit ist die Möglichkeit, mit dem CO₂ bestehende Erdgas oder Ölfelder weiter ausbeuten zu können, da durch das Einblasen zusätzlicher Druck entsteht und Gas und Öl herausgedrückt werden, die vorher nicht mehr gefördert werden konnten. Dieser Effekt ist kontraproduktiv für den Klimaschutz, kann aber unter Umständen die Abscheidung zusätzlich finanzieren und allenfalls zu einem tieferen Rate on Equity (ROE) führen und damit dazu beitragen, dass die fossilen Rohstoffe mit einem geringeren Energieverbrauch produziert werden. Dadurch kann z.B. der Abbau von sehr energieintensiven, umweltschädlichen Ölschiefersänden unrentabel werden.

2.7.4 Risiken

Laut Christophe Nussbaum von swisstopo bestehen vor allem folgende Risiken (siehe auch Abbildung 29), wobei zu unterscheiden ist, ob es sich um allmähliche oder abrupte Leckagen handelt:

- Leckagen im CO₂-Reservoir oder beim Einblasen, durch die CO₂ in die Atmosphäre zurück entweichen kann
- durch ein CO₂-Leck wird Grundwasser verunreinigt
- seismisches Risiko (für Erdbeben), durch CO₂-Injektion in das Reservoir.

Mangelnde Sicherheit der CO₂-Lagerstätten könnte ein Risiko für die darüber befindlichen Infrastruktur und Gebäude aber auch für Natur darstellen.

Risiko der Nicht-Akzeptanz bei der Bevölkerung, wobei davon auszugehen ist, dass die Akzeptanz für offshore Speicherung höher ist als bei Speicherung auf dem Land, speziell wenn dieses besiedelt ist. Da bisher noch keine Erfahrungen über sehr lange Zeiträume existieren (Sleipner Projekt in Norwegen wurde 1996 gestartet), lässt sich das Langzeitrisiko noch nicht gut abschätzen.

Ein weiteres Risiko besteht darin, dass gemäss bisherigem Rechtsrahmen die Kantone hoheitlich über Angelegenheiten des Untergrunds bestimmen (siehe Abschnitt 2.6). Es besteht daher das Risiko, dass keine Einigung zwischen Bund und Kantonen gefunden werden kann und ausserdem Probleme durch Einschränkung der Rechte von privaten Grundeigentümern entstehen.

Es besteht das Risiko einer hohen Nachfrage nach Speicherkapazitäten im Ausland, was bei begrenztem Angebot zu hohen Preisen führen würde. Da durch die notwendigen Infrastrukturinvestitionen zusätzlich eine höhere Abhängigkeit besteht, wäre es strategisch sinnvoll,

wenn neben den ausländischen Speicherkapazitäten auch nationale Speicherstätten erschlossen werden, da damit die Verhandlungsposition gestärkt wird und bei Wartungen der Pipeline oder anderen Problemen eine Alternative für die Speicherung besteht (Diskussion Workshop).

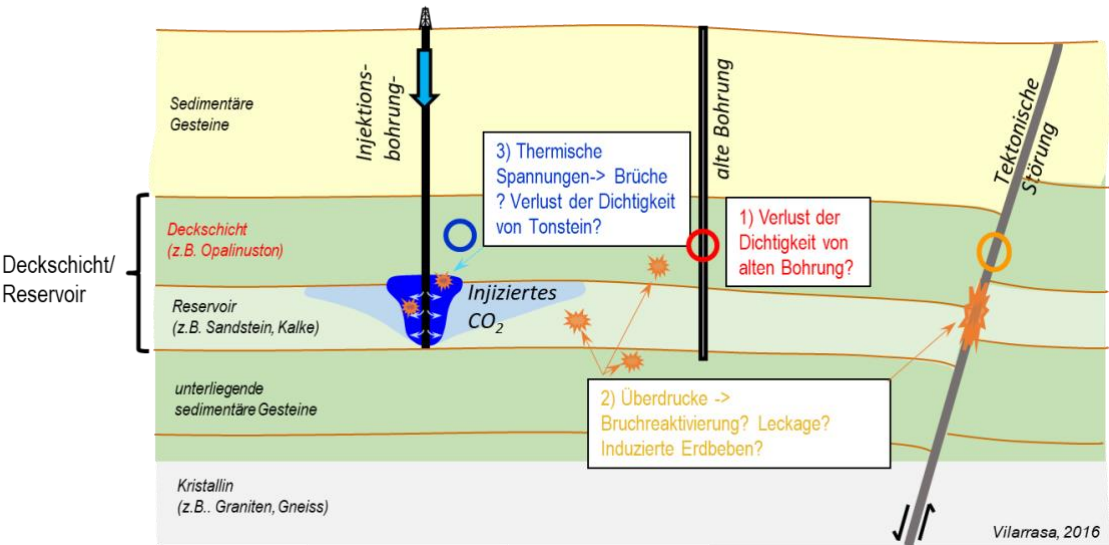


Abbildung 29: Mögliche Ursachen von induzierter Mikroseismizität und Seismizität im Zusammenhang mit der geologischen Kohlenstoffspeicherung (Vilarrasa 2016)

2.7.5 Schätzungen der Kosten, des Potenzials und der wichtigsten Treiber

Die Kosten werden in den Energieszenarien 2050+ für die reine CO₂-Speicherung in der Schweiz mit 40 CHF/tCO₂ in 2030, die im Verlauf der Zeit sinken und in 2060 bei 26 CHF/ tCO₂ liegen angesetzt (siehe Tabelle 12), wobei für die reine Speicherung offshore im Ausland in Salzstöcken 10 CHF/tCO₂ angegeben wird (Kemmler et al. 2021).

Laut einer Literaturrecherche von Brunner und Knutti (2022) werden die Kosten für die Speicherung in Salinen Aquifer auf 6-19 CHF/tCO₂ und in reaktiven Gesteinsschichten auf 2-23 CHF/tCO₂ geschätzt, womit die von den Energieszenarien angenommenen Kosten eher konservativ sind.

Tabelle 12: Kosten für die Speicherung von CO₂ im Untergrund (Kemmler et al. 2021, p. 34)

Speicherung	Typologie	Kosten aktuell (min EUR / tCO ₂)	Kosten aktuell (max EUR / tCO ₂)
Onshore	• Ausgebeutete Gas- und Erdöllagerstätten Bohrung / Brunnen wiederverwenden	1	7
	• Ausgebeutete Gas- und Erdöllagerstätten Bohrung / Brunnen nicht wiederverwenden	1	10
	• Saline Aquifere	2	12
Offshore	• Ausgebeutete Gas- und Erdöllagerstätten Bohrung / Brunnen wiederverwenden	2	9
	• Ausgebeutete Gas- und Erdöllagerstätten Bohrung / Brunnen nicht wiederverwenden	3	14
	• Saline Aquifere	6	20

Global

Weltweit gibt es über 10'000 Gt CO₂ theoretische Speicherkapazitäten, wobei 80% der Kapazität in Salzstöcken liegt und derzeit in der Praxis z.B. aus technischen und geologischen Gründen nur ein kleinerer Teil des theoretischen Potentials nutzbar ist, wobei dies immer noch gross genug wäre, um die Temperatur bei 1.5 °C bis 2100 zu halten.

Tabelle 13: Geschätztes, globales geologisches (unterirdisches) Speicherpotential (GtCO₂) (Clarke et al. 2023, p. 641)

Speicherungsart	Afrika	Australien	Kanada	China	CSA	EEU	FSU	Indien	MEA	Mexiko	ODA	USA	WEU
Erweiterte Erdölförderung	3	0	3	1	8	2	15	0	38	0	1	8	0
Ausgebeutete Erdöl- und Gasfelder	20	8	19	1	33	2	191	0	252	22	47	32	37
Verbesserte Verwertung von Kohleflözmethan	8	30	16	16	0	2	26	8	0	0	224	90	12
Tiefe saline Aquifere	1000	500	667	500	1000	250	1000	500	500	250	1015	1000	250

Anmerkung: CSA = Mittel- und Südamerika; EEU = Osteuropa; FSU = Ehemalige Sowjetunion; MEA = Mittlerer Osten; ODA = Sonstiges Asien (ausser China und Indien); WEU = Westeuropa

Laut dem Global CCS Institute (2021) nach Präsentation von Christophe Nussbaum (Nussbaum 2023):

- Sind 27 Projekte in Betrieb und speichern 36,6 MtCO₂/Jahr.
- Befinden sich 62 weitere Projekte entweder im Bau (n=4) oder in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase (n=58).
- Sind 44 weitere Projekte in einer frühen Entwicklungsphase.

Wenn alle diese Projekte erfolgreich eingesetzt werden, würde das kumulierte Speicherpotenzial etwa 150 MtCO₂/Jahr betragen.

Europa

Wie bereits im Kapitel 2.6 erwähnt plant die Firma TES den Bau eines Pipeline Netzwerkes für den Transport von grünem H₂ in Form von Methan. Innerhalb dieses Projektes werden auch CO₂ Pipelines geplant und erstellt. TES ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das zur OGE gehört, mit dem Ziel die Dekarbonisierung mit Hilfe von grünem Wasserstoff zu unterstützen. Es baut derzeit Energieversorgungs- und Importzentren in Deutschland, den Benelux-Ländern, Frankreich, dem Nahen Osten, Kanada, Australien, Nordafrika, Südafrika und den Vereinigten Staaten auf, um globale Lieferketten zu integrieren und zu optimieren. TES ist mit Energie 360° und dem VBSA eine Partnerschaft eingegangen. TES will Energie 360° ab 2027 jährlich mit rund einer TWh erneuerbares synthetisches Methan (e-NG) beliefern. Energie 360° will im Gegenzug erneuerbares CO₂ an TES liefern und OGE entwickeln gemeinsam ein 1000 Kilometer langes CO₂-Transportnetz in Deutschland, das den TES Green Energy Hub in Wilhelmshaven mit mehreren Industriestandorten verbindet, an die das CO₂ verschifft und anschliessend sequestriert oder für die Produktion von e-NG wiederverwendet wird. Die strategisch wichtigen Standorte der Schweiz, wie z. B. Basel, können per Zug oder mit Pipelines an diese Infrastruktur angeschlossen werden.

Schweiz

In der Schweiz gab es verschiedene Studien zur Schätzung des CO₂ Speicherpotentials, welche jedoch noch sehr unsicher sind und nach der Motion 20.4063 in Abklärung sind. Eine ältere rein theoretische Studie (Chevalier et al. 2010) basierend auf Literaturanalyse kam zu dem Ergebnis, dass 2.68 Gt CO₂ in Molasse im Westjura gespeichert werden könnten, dabei 0.7 Gt CO₂ im oberen Muschelkalk. Eine neuere Studie der Uni Bern kommt zu einem sehr viel geringeren Potenzial für CO₂-Speicherung im oberen Muschelkalk Aquifer von nur noch 52 MtCO₂, zwischen Olten und Schaffhausen (siehe Abbildung 31). Laut den Energieszenarien 2050+ sollen dabei im Jahr 2050 3 Mio. t CO₂ im Inland gespeichert werden (8.6 Mio. t CO₂ im Ausland), womit nach ca. 17 Jahren der Speicher voll wäre, wenn nicht weitere Optionen gefunden werden.

Von Swisstopo wird empfohlen, dass aktuelle genauere Abschätzung des Speicherpotenzials unter dem Schweizer Mittelland mit neuen geologischen 3D-Daten von swisstopo in Kombination mit den verfügbaren physikalischen Parametern (Porosität, Permeabilität) (insbesondere dank der Tiefenbohrungen der Nagra) und Integration des Speicherpotenzials in Bruch- und Karstgestein gemacht werden.

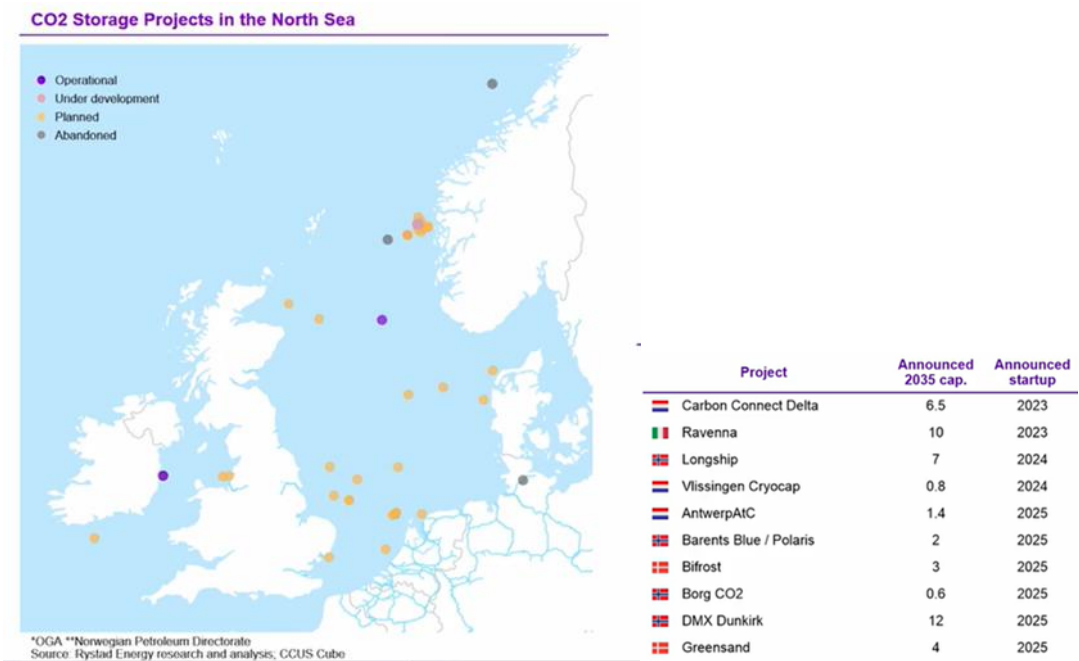


Abbildung 30: CO₂ Speicher Projekte in der Nordsee (Rystad 2022)

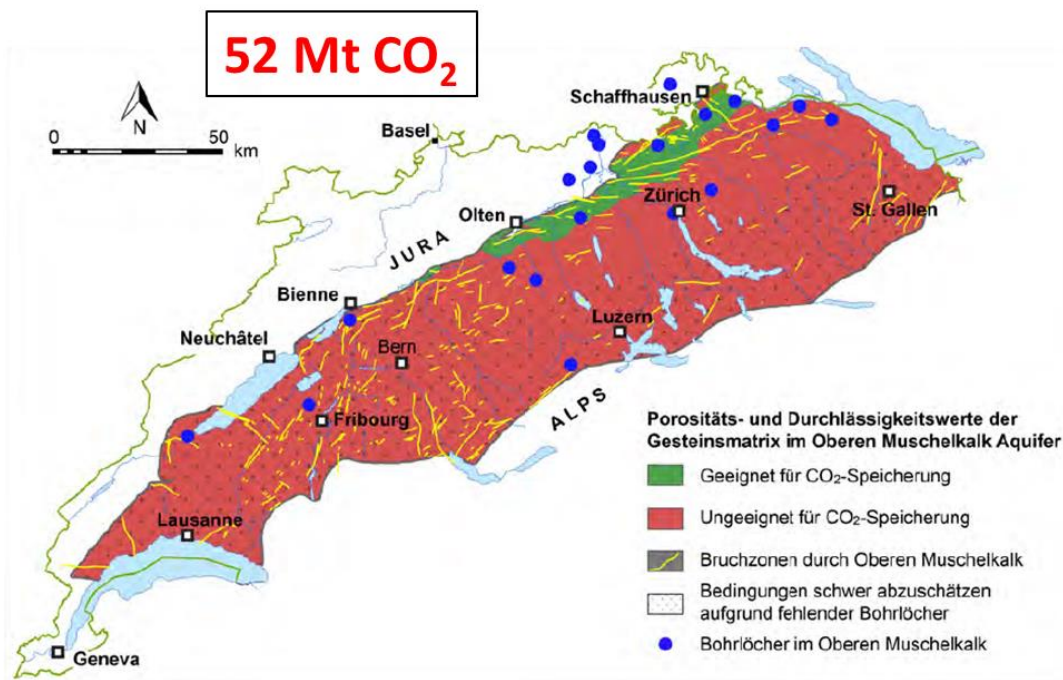


Abbildung 31: Potenzial für CO₂-Speicherung im Oberen Muschelkalk Aquifer, Schweiz (Diamond 2019)

2.7.6 Relevante Akteure

Für die Speicherung, das letzte Glied in der Kette von CCS, sind neben allen im Vorfeld genannten Akteuren, die von Emittenten bis hin zu regulatorischen Ämtern reichen, besonders folgende Akteure wichtig:

Das **Bundesamt für Landestopographie** spielt bei der Lagerung eine Rolle.

Untergrund Projekte, Verbände und Firmen, die sich mit Bohrungen im Untergrund auskennen, z.B. Cargo Sous Terrain, Geologische Erdwärme, im Besonderen die tiefe Geothermie oder NAGRA.

Experten und Forscher für den Schweizer Untergrund wie **Swisstopo**, spielt eine grosse Rolle, vor allem bei Fragen zur Speicherung der abgeschiedenen Materialien.

Eine Darstellung der relevanten Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette von CCS Projekten ist in Kapitel 3.1 dargestellt.

2.7.7 Nationale und internationale Politiken und Anreize

In der Schweiz

Bislang gibt es in der Schweiz keine Politik, die Anreize für die CO₂ Speicherung schafft. Zurzeit führt Swisstopo Untersuchungen durch, um eine aktualisierte Schätzung des inländischen Speicherpotenzials zu erstellen (Projekt in Trüllikon).

International

In Deutschland gibt es ein Gesetz zur CO₂ Speicherung (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz oder KSpG), das die Erforschung, Erprobung und Demonstration von CO₂ Speichieranlagen in Deutschland ermöglicht, allerdings mit Beschränkungen des gesamten Speichervolumens im gesamten Land und innerhalb einzelner Projekte. Jedes Bundesland ist berechtigt, die Gebiete festzulegen, in denen die CO₂ Speicherung erlaubt ist. Für die Genehmigung von Speicherprojekten werden strenge Umweltauflagen sowie umfassende Überwachungspläne festgelegt.⁶³

Laut der IEA Climate Policies-Datenbank haben mehrere andere Länder Gesetze zur Regulierung der Speicherung von CO₂ erlassen, darunter Australien (auf subnationaler Ebene in Queensland und Victoria), Kanada (subnational in Alberta und Saskatchewan), Indonesien (mit Schwerpunkt auf EOR und der Nutzung erschöpfter Öl- und Gasfelder), Norwegen, das Vereinigte Königreich und die USA (wo 2017 laut Cleveland (2017)). Solche Gesetze enthalten in der Regel Bestimmungen zum Eigentum am unterirdischen Porenraum, zu Explorations- und Nutzungsrechten, zur Sicherheit, zu Genehmigungen und zu Nachsorgeverpflichtungen und weisen die Verantwortung für Überwachung und Haftung zu. Häufig wird ein Fonds eingerichtet, um die langfristige Überwachung und potenzielle Sanierungskosten im Falle von Leckagen zu unterstützen.

Auf EU-Ebene legt die Richtlinie über die geologische Speicherung von Kohlendioxid aus dem Jahr 2009⁶⁴ einheitliche Mindestanforderungen für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von CO₂ in den Mitgliedstaaten fest. Dazu gehören beispielsweise spezifische Anforderungen an die Auswahl und den Betrieb von Speicherstätten sowie an deren Überwachung, die darauf abzielen, CO₂ Leckagen zu verhindern, zu minimieren und gegebenenfalls zu beheben.

Da CO₂ im Meeresboden gespeichert werden kann, sind das Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR) sowie das Londoner Protokoll über die Verhütung der

⁶³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#rechtsvorschriften-fur-ccs>

⁶⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0031>

Verschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen von Bedeutung. Sie verbieten zwar die CO₂ Speicherung in der Wassersäule, lassen sie aber am Meeresboden zu, sofern ihre Anforderungen an den Schutz der Meeresumwelt erfüllt sind.

EU-Projekte von gemeinsamem Interesse erweisen sich als ein wichtiger Weg, um die Planung und Entwicklung von Speicherstätten unter günstigen rechtlichen und wirtschaftlichen Bedingungen zu beschleunigen. Vor allem Projekte wie Northern Lights wurden für eine EU-Finanzierung vorausgewählt, wobei 4,25 Millionen Euro für FEED-Studien (Front-End Engineering Design) der Phase 2 bereitgestellt wurden. Northern Lights, das als fünftes PCI-Projekt aufgeführt ist, hat 18 Projektträger und 22 verbundene Unternehmen, was ein erhebliches Erschließungspotenzial von etwa 19 Millionen Tonnen pro Jahr (Mtpa) allein durch die Projektträger und etwa 32 Mtpa unter Einbeziehung der verbundenen Unternehmen bedeutet. Diese Projektträger verteilen sich auf Norwegen, Frankreich, Belgien, die Niederlande, Deutschland, Schweden und Finnland und verdeutlichen die Vielfalt der Teilnehmer, die sich mit der CO₂ Abscheidung und dem Transport beschäftigen. Standardisierungsbemühungen und die Zusammenarbeit bei Abscheidungsstandorten verbessern die Aussichten für eine effiziente und effektive Entwicklung der CO₂ Transportinfrastruktur im Rahmen des PCI weiter.

2.7.8 Finale Einschätzung

Von den Speichieranbietern werden Zuverlässigkeit und Vertrauen sowie Kompetenz und Flexibilität bei der CO₂ Abnahme verlangt. Idealerweise wären sowohl eigene nationale Kapazitäten als auch mehrere internationale Anbieter verfügbar, so dass es weniger Abhängigkeiten und einen gewissen Wettbewerb gibt. Die Schweiz scheint jedoch nur über geringe eigene Speicherkapazitäten zu verfügen und wird sich entweder auf Speicherstätten in der Nordsee (Dänemark, Norwegen, Island) oder in Italien (Ravenna) verlassen müssen. Um diese Speicherstätten zu erreichen, müssen bestehende Gaspipelines entweder durch Deutschland oder von Monthey (CH) nach Genua (IT) genutzt werden.

Bei dieser eher geringen Speicherkapazität in der Schweiz ist es wichtig, die Speicherung im Ausland zu legitimieren. Kommt es zu einer Speicherung im Ausland, braucht es Staatsverträge oder Rahmenvereinbarungen. Ausserdem sind langfristige Verträge zwischen Emittenten und Speichieranbietern eine Voraussetzung.

3 Akteure, Projekte und Politiken

3.1 Akteure

Eines der Ziele des DeCIRRA Subprojekt 3 ist es zu verstehen, welche Akteure in die Planung und Umsetzung der verschiedenen CCUS- und NET-Ansätze einschließlich der erforderlichen Infrastruktur einbezogen werden müssen, um eine erfolgreiche Finanzierung und Kommunikation in der Schweiz zu erreichen? Daher legen wir einen Schwerpunkt auf die Akteursanalyse. Im vorliegenden Dokument werden die Akteure bereits im Detail in den einzelnen Technologie-Kapiteln beschrieben. In diesem Kapitel gehen wir daher eher auf allgemeine Analysen und übergreifende Auswertungen zu den Akteuren ein. Im Rahmen des Projektes DeCIRRA wurden die Akteure im Rahmen von drei Masterarbeiten untersucht, ausserdem gab es einen Workshop der sich explizit mit Akteuren beschäftigte und während der gesamten Projektdauer wurde eine Liste von NET Akteuren aufgebaut, in der sowohl Kontaktdaten von relevanten Personen, wie auch eine Zuteilung auf verschiedene Rollen, Technologien und Aktivitäten vorgenommen wurde. Diese Liste enthält derzeit rund 700 Einträge und wird laufend aktualisiert.

Die relevanten Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette von CCU und CCS wurden im Rahmen der Masterarbeit von Cedric Tanner (2022), auf Basis von 14 qualitativen Interviews identifiziert und grafisch klassifiziert (siehe Abbildung 32).

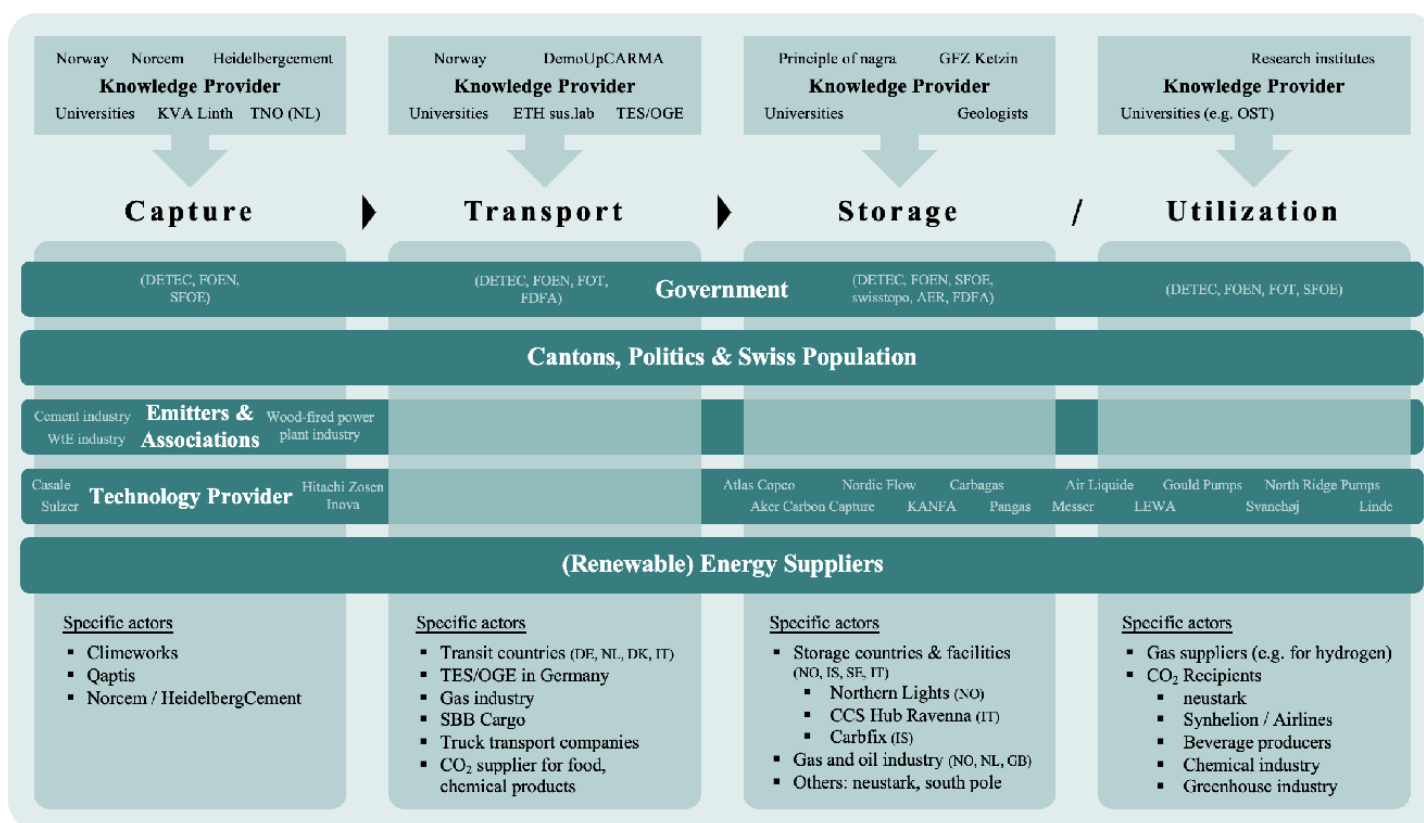


Abbildung 32: Relevante CCS und CCU Akteure in der Schweiz entlang der Wertschöpfungskette (Tanner 2022)

Anmerkung: AER = Federal Office for Spatial Development; DETEC = Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications (de: UVEK), FOEN = Federal Office of Energy, SFOE = Swiss Federal Office of the Environment (de: BAFU), FOT = Federal Office of Transport (de: BAV); FDFA = Federal Department of Foreign Affairs (de: EDA)

In einer zweiten Masterarbeit fokussierte sich Sofia Cafaggi (2022) auf die Akteure im Bereich Biochar und Holzbau und führte 15 qualitative Interviews mit relevanten Personen aus dem DeCIRRA Netzwerk.

Beide Masterarbeiten fokussierten sich auf die Reife der verschiedenen Technologien, die derzeit in der Schweiz bestehenden Hürden, sowie auf die Rollen der Akteure, um die jeweiligen Technologien voranzubringen. Die Analyse der Akteure wurde in diesen Arbeiten eher anhand der Wertschöpfungskette des CO₂'s gemacht, welche in Abbildung 32 in den Spalten zu sehen ist. Quer dazu agieren verschiedene Akteure, die in alle den Prozessen mitwirken.

Im Rahmen einer weiteren Masterarbeit (Dittli 2023) wurden die NET Akteure weiter klassifiziert und eine breite quantitative Umfrage auf Basis der DeCIRRA Personenliste durchgeführt, wobei von den 385 angeschriebenen Kontakten 139 die Umfrage abgeschlossen haben. Dabei wurden sowohl ihre Rollen, wie auch die Einstellung zu verschiedenen Politiken, sowie die Zusammenarbeit der Akteure untereinander abgefragt.

Gemäss unserer Evaluation können alle Akteure mind. einer der folgenden vier Rollen «Anbieter», «Nachfrager», «Regulator» und «Dienstleistungen & Support» zugewiesen werden (Abbildung 33). Die Anbieter bieten dabei NET Dienstleistungen an, z.B. führen Projekte durch, um CO₂ zu speichern. Die Nachfrager emittieren CO₂ und brauchen NET Dienstleistungen, die Regulierer schaffen die Regulationen, Gesetze und Rahmenbedingungen für die NET und die «Dienstleistungen & Support» Akteure, welche auch als sonstige Dienstleister bezeichnet werden, bringen weitere Dienstleistung zur Unterstützung des NET, z.B. Forschung, oder auch Information oder Finanzierung. Der Übergang von den Anbietern zu den sonstigen Dienstleistern ist fließend, da Teile der Anbieter gleichzeitig in der Forschung oder auch an den Regulationen mitarbeiten. Zusätzlich sind fast alle Organisationen selbst auch Emittenten von CO₂ und kommen damit potenziell als Nachfrager in Frage. In dieser Arbeit wurden die Nachfrager auf sehr grosse Emittenten, z.B. Zementproduzenten usw. beschränkt.

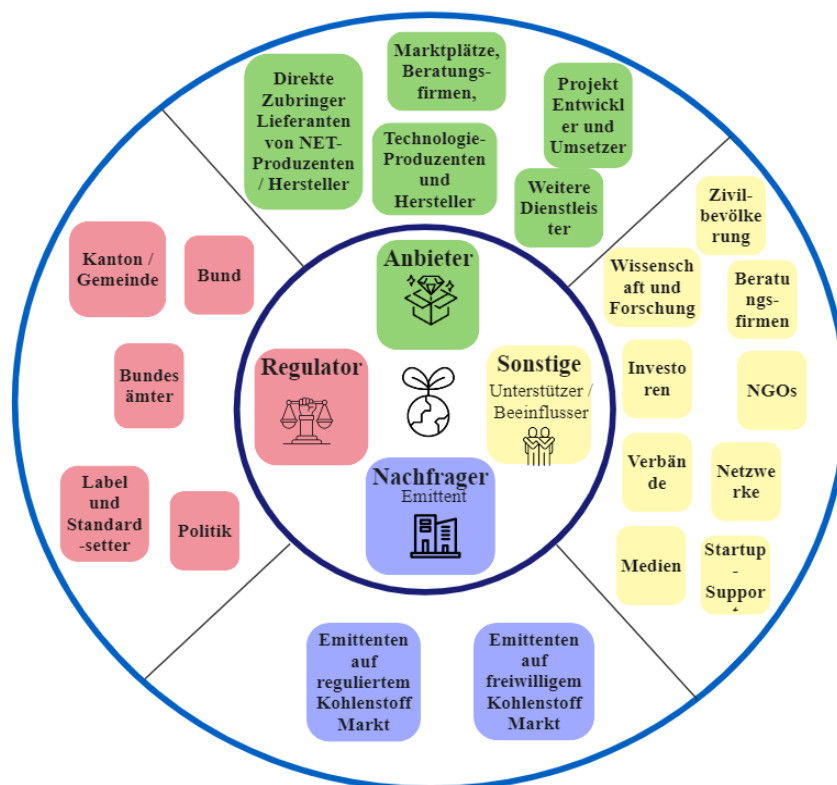


Abbildung 33: Rollen im NET Akteurs-Netzwerk

Anmerkung: Im inneren Kreis werden die vier Rollen Anbieter, Nachfrager, Regulator und Dienstleistungen & Support abgebildet, während im äusseren Kreis die jeweiligen dazugehörigen Akteursgruppen aufgeführt sind. Gewisse Akteure haben mehr als eine Rolle.

Wie man in Abbildung 34 sieht, konnten bei der Umfrage alle verschiedenen NET Akteure erreicht werden. Im Vergleich zur Grundgesamtheit in der DeCIRRA Liste gibt es nur leichte Verschiebungen in Richtung Anbieter und Emittenten, da sich etwas mehr der Antwortenden in diese Kategorien einstufen als in unserer Liste angenommen.

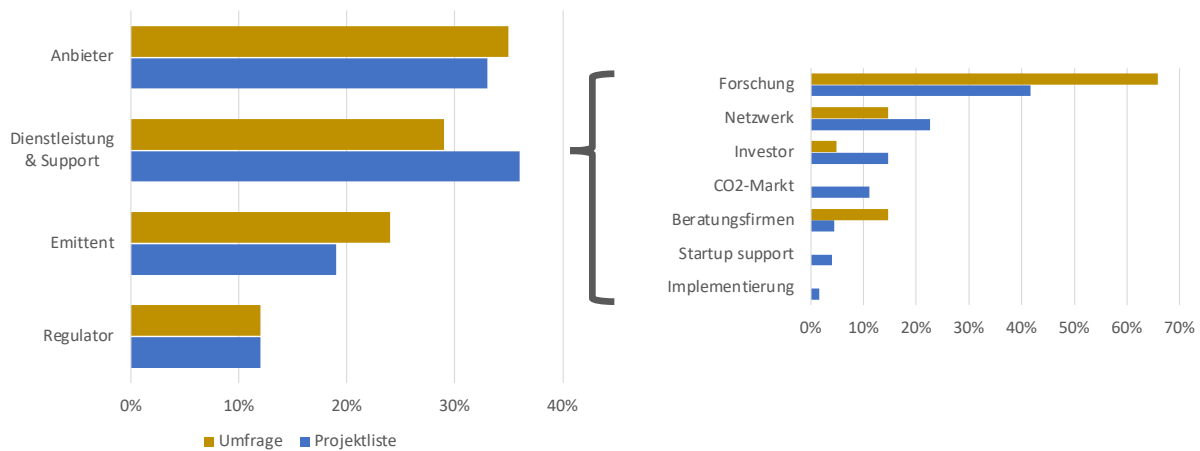


Abbildung 34: Rollen der DeCIRRA Akteure in der für DeCIRRA zusammengetragenen Liste von 711 Einträgen, im Vergleich zu den 139 Umfrageteilnehmern.

Für alle untersuchten Akteure ist mindestens eine der untersuchten NET bereits heute oder in Zukunft von grosser Relevanz (siehe Abbildung 35), BECCS und CCS/CCU wurden dabei am meisten genannt.

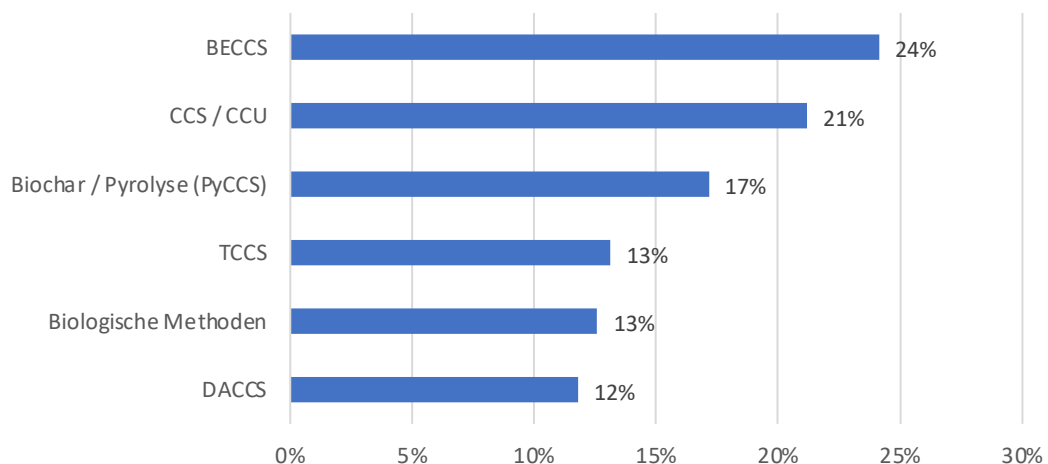


Abbildung 35: Welche der NET-Technologien ist für Ihre Arbeit derzeit oder in naher Zukunft relevant. Mehrfachnennungen möglich.

Die meisten der Befragten schätzen die eigene Organisation als sehr wichtigen (27%) oder wichtigen (46%) NET Akteur ein. Zusätzlich wurde gefragt, welche anderen Akteure wichtig sind. Dabei zeigt sich, dass die Bundesämter BFE und BAFU von über 80% der Befragten als sehr wichtig eingestuft werden, direkt gefolgt von den Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und der ETH Zürich. Auch sehr wichtig sind die Räte, also sowohl National-, wie Ständerat und Bundesrat (siehe Abbildung 36).

Die Befragung zeigt, dass bereits zwischen vielen Akteuren eine enge Zusammenarbeit vorliegt (Abbildung 37), z.B. mit den als sehr wichtig eingestuften Akteuren BAFU und BFE. Besonders das BAFU sticht hier sehr stark heraus und wird von 71% der Befragten genannt. Eine mögliche Hürde für die schnelle Implementierung der NET könnte sein, dass mit einigen für die Schweizer NET-Politik als

wichtig eingestuft. Emittenten aus der Industrie mehrheitlich keine enge Zusammenarbeit besteht, z.B. Zement (65-74%), der Chemie (68%), Stahl (72%) und Nahrungsmittel (78%). Im Vergleich dazu sind die KVA schon recht gut vernetzt und rund die Hälfte der Befragten haben eine enge Zusammenarbeit mit ihnen angegeben. Etwas in der Mitte sind die Heizwerke mit rund 40% engen Partnern.

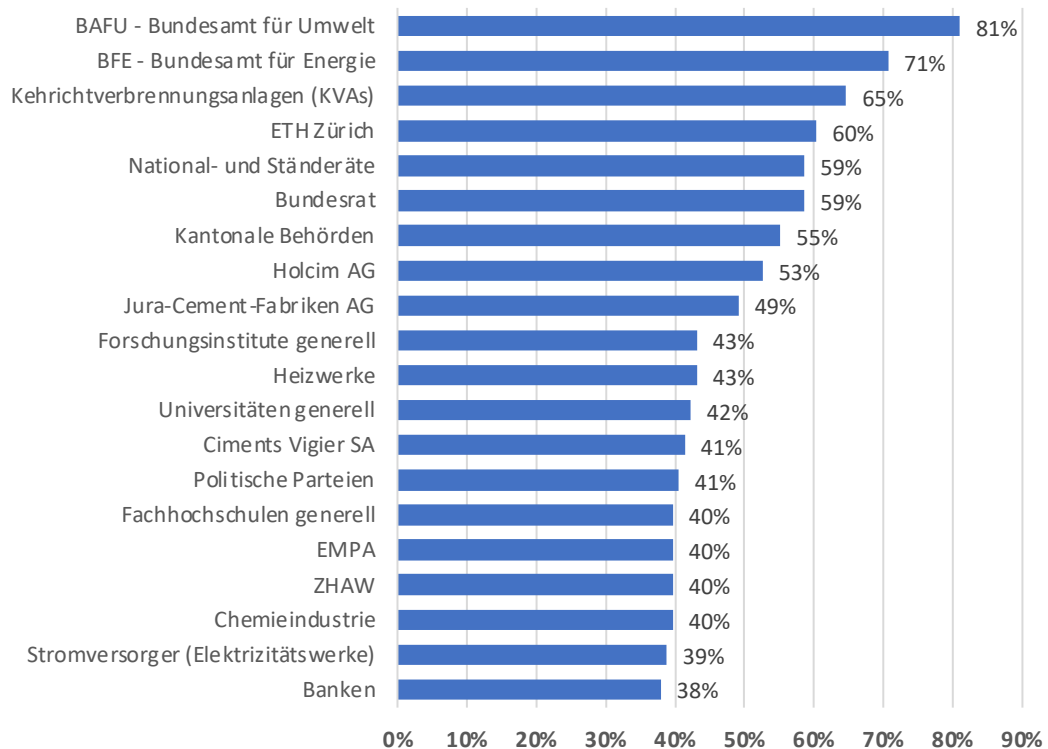


Abbildung 36: Sehr wichtige Akteure für Schweizer CDR-Politik

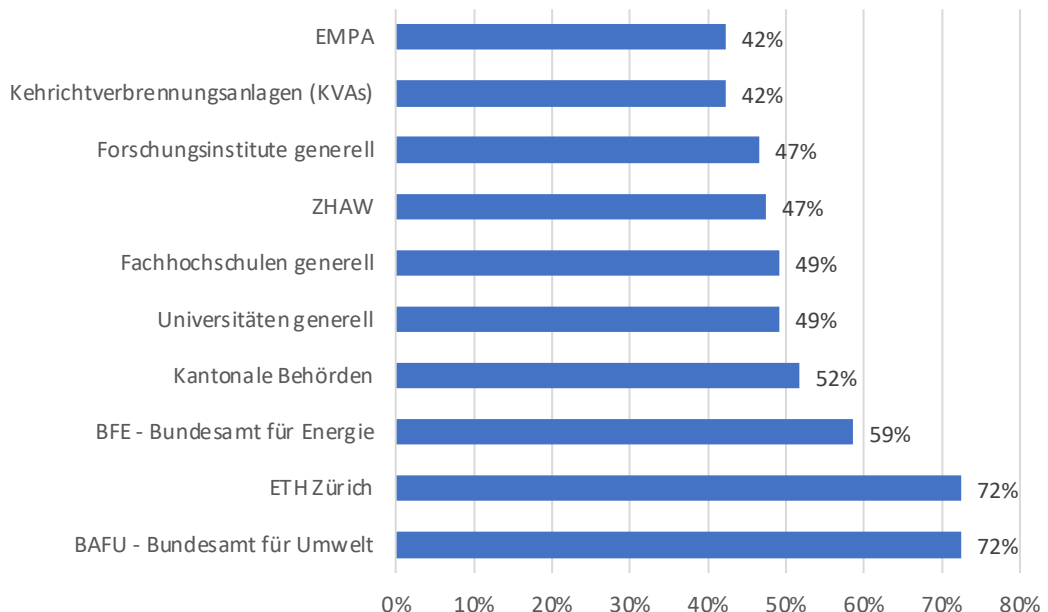


Abbildung 37: Akteure die besonders häufig auf die Frage, ob eine enge Zusammenarbeit besteht, genannt wurden.

Abbildung 38 zeigt schliesslich das Kooperationsnetzwerk, das auf der Grundlage der Antworten der Schweizer NET-Akteure erstellt wurde. Grössere Kreise haben Akteure, die zentraler im Netzwerk sind, d.h. die mehr Verbindungen zu anderen Akteuren haben. Die Farben bezeichnen die verschiedenen Akteurstypen, wobei die sonstigen Dienstleistungs- und Unterstützungsanbieter weiter aufgeschlüsselt wurden. Hier wiederum erscheinen die ETH Zürich, aber auch die mit NET befassten zentralen staatlichen Stellen BFE und BAFU sehr zentral, sowie einige aktuelle oder potentielle Anbieter von NET-Dienstleistungen, darunter Biokohleproduzenten, die Holzindustrie und Projektentwickler wie Southpole. Es wird auch deutlich, dass die verschiedenen Branchenverbände und Vernetzungsplattformen - darunter Cemsuisse, die Schweizer CDR-Plattform und die verschiedenen holzbezogenen Verbände - bereits eine wichtige Rolle bei der Vernetzung der Akteure spielen.

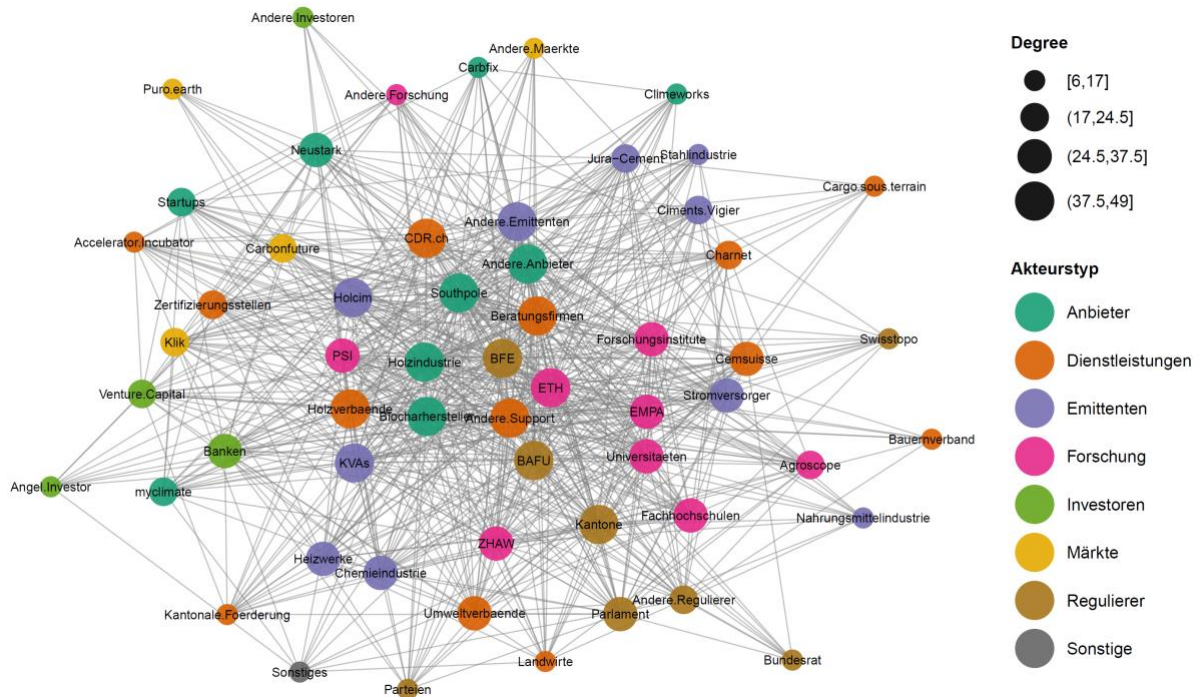


Abbildung 38: Das enge Kooperationsnetzwerk zwischen den befragten Schweizer NET-Akteuren

Zusammenfassend kann man sagen, dass viele der Schweizer NET Akteure schon sehr gut vernetzt sind. Im Rahmen des Projektes wird es nun wichtig sein aufzuzeigen, wo das Netzwerk noch verbessert werden kann und welche wichtigen Akteure noch weiter eingebunden werden müssen.

3.2 Swiss CDR Projekte

Im Rahmen von DeCIRRA wurden aktuelle CDR Projekte gescreent und in einer [Liste gesammelt](#). Wir haben uns dabei auf Projekte konzentriert, die entweder auf die Schweiz fokussiert sind, von der Schweiz aus finanziert werden oder einen starken Bezug zur Schweiz haben. Einige wenige weitere Projekte haben wir in die Liste aufgenommen, weil sie von Projektpartnern genannt wurden, die in irgend einer Form beteiligt gewesen sind. Diese Liste wurde im Frühjahr 2023 erhoben und es wird versucht diese während der Projektlaufzeit möglichst einmal im Jahr zu aktualisieren.

Von den 140 untersuchten Projekten haben 44 keinen direkten CDR Bezug gehabt und wurden nicht weiter ausgewertet. Die 96 Projekte mit CDR Bezug wurden subjektiv nach Relevanz für das DeCIRRA Projekte eingeteilt, wobei rund 30 Projekte eine hohe und 29 eine mittlere Relevanz haben. 71 Projekte sind in der Schweiz oder weisen einen starken Schweiz-Bezug auf. Rund 42 Projekte sind bereits abgeschlossen, die meisten davon in den letzten Jahren. 53 Projekte laufen noch, wobei davon rund 16 als permanente Projekte eingestuft werden können, die vielleicht eher bei den Akteuren eingeordnet

werden sollten. Es handelt sich dabei um dauerhafte Vernetzungs- oder Förderungsprojekte. Die meisten Projekte werden vom SNF oder Innosuisse gefördert, viele sind in der Aramis Datenbank des Bundes zu finden.

Die Projekte wurden nach ihrem Fokus kategorisiert, also z.B. ob sie eher eine technologische oder ethische Ausrichtung haben. Die meisten Projekte (82) haben einen technischen Fokus und rund 20 untersuchen politische oder wirtschaftliche Fragen. Weniger Projekte beschäftigen sich mit ethischen Fragen. Es gibt auch Projekte mit eher allgemeinem oder sehr breitem Fokus, die sich mit verschiedenen oder sogar allen Fokusthemen beschäftigen.

In der folgenden Abbildung 39 sieht man, mit welchen Technologien sich die Projekte beschäftigen. Über 30 Projekte erforschen Fragen zum CCS Capture an grossen Punktquellen, hier sind viele technische Projekte angesiedelt, die neue Materialien oder Verfahren testen. Auch Biochar wird intensiv beforscht, mit über 25 Projekten. Nur ein Projekt lässt sich klar dem Transport von CO₂ zuordnen und auch im Bereich Holzbau gibt es noch vergleichsweise wenig Projekte.

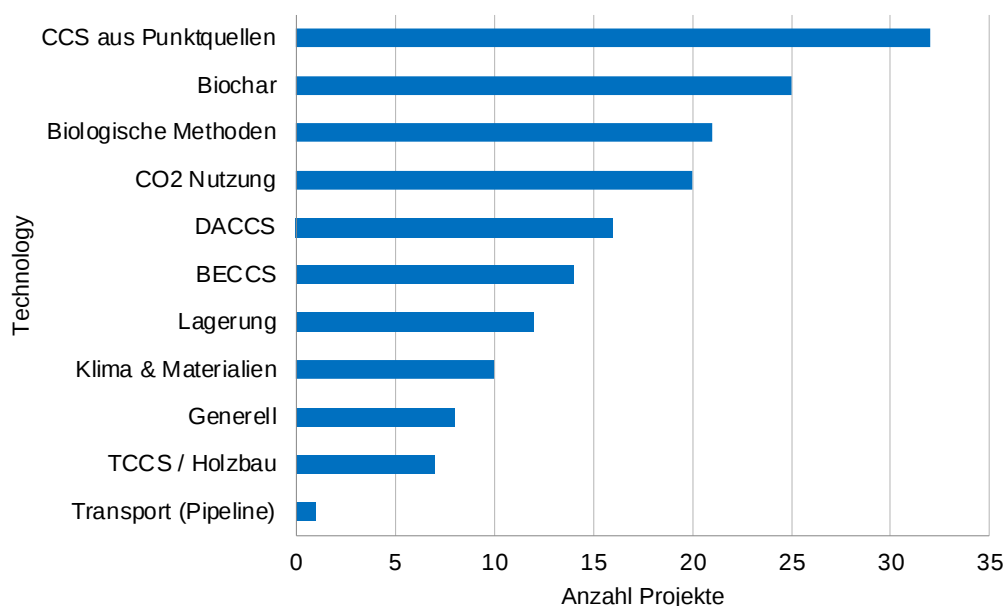


Abbildung 39: Anzahl der geprüften Projekte, die sich mit den verschiedenen Technologien befassen. Die Projekte unter dem Stichwort: Klima, Material und Allgemein konnten keiner bestimmten CDR-Technologie zugeordnet werden.

Die Analyse zeigt, dass sich ein Austausch mit anderen Projekten lohnt, damit es nicht zu Doppelspurigkeiten kommt. Im Rahmen des DeCIRRA Projekts erfolgte dies bisher über Workshops, im weiteren Verlauf wollen wir via diese Projekt-Analyse weitere relevante Experten identifizieren.

3.3 Präferenzen zu Politikinstrumenten der Akteure

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir für jeden der vier CCUS-Ansätze ein Screening der in der Schweiz und weltweit bestehenden Politiken und Vorschriften zur Unterstützung der Einführung der analysierten CCUS-Optionen durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden erste Lücken im bestehenden Politikmix identifiziert.

Eine sehr umfassende Informationsquelle zu politischen Massnahmen von CCUS-Konzepten ist die IEA Politiken-Datenbank.⁶⁵ Von den 145 Politiken und Maßnahmen in der ganzen Welt, die in dieser

⁶⁵ <https://www.iea.org/policies>

Datenbank für CCUS-Technologien identifiziert wurden (einschließlich der geltenden, beendeten, geplanten und angekündigten Politiken), stellt die große Mehrheit eine Art direkter Finanzierung für Investitionen (43 Politiken) oder für F&E- und Demonstrationsprojekte (35 Politiken) bereit. Andere gemeinsame Politiken legen einen Rechtsrahmen für CCUS-Technologien fest, der häufig die Genehmigung, das Eigentum, die Überwachung und die langfristige Haftung für Speicherstätten (31 Politiken) oder eine Strategie oder ein Ziel für deren Einsatz (16 Politiken) umfasst. Weitere Unterstützungsmaßnahmen umfassen Steuergutschriften oder andere Arten von Steueranreizen für CCUS-Investitionen und -Forschung (in den USA, Österreich, Kanada und Malaysia), Betriebssubventionen für CCUS-Anlagen (in Australien und den Niederlanden), Emissionsnormen für Kohlekraftwerke, die voraussichtlich den Einsatz von CCUS erfordern (Kanada), Kohlenstoffgutschriften für CCS-Anwendungen (Kalifornien) sowie eine geplante umgekehrte Versteigerung für biogene CCS-Anlagen in Schweden.

Präferenzen der Schweizer CCUS-Akteure bzgl. Politikinstrumenten

Die Einstellung der CCUS-Akteure zu verschiedenen politischen Maßnahmen zur Unterstützung der einzelnen CCUS-Ansätze wurde im Rahmen der Masterarbeit von Luca Dittli gesammelt und analysiert (2023). Die Teilnehmer an der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Umfrage wurden gebeten, die folgenden politischen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterstützung der spezifischen CCUS-Ansätze, die für sie am wichtigsten waren, zu bewerten (spezifische Frage: "Um unsere Klimaziele zu erreichen, müssen wir CDR in grossem Massstab nutzen. Bitte ordnen Sie die folgenden politischen Instrumente nach ihrer Eignung, um <ausgewähltes CCUS-Technologie> zu skalieren. Rang 1 = größte Anwendbarkeit, Bitte alle Elemente anklicken und an den richtigen Platz schieben"):

- **CO₂ Preis**, entweder durch eine CO₂ Abgabe (wie bei der Schweizer CO₂ Abgabe) oder ein Emissionshandelssystem (wie beim Schweizer ETS)
- Ausstellung von **handelbaren Zertifikaten** für die biologische oder technische CO₂ Entfernung, die auf einem CO₂ Markt verwendet werden können
- **Befreiung von der CO₂ Abgabe** für Anlagen, die NETs zur Beseitigung ihrer Emissionen einsetzen oder Kohlenstoffabscheidungseinheiten kaufen
- **Steuergutschriften** für die Beseitigung und/oder Speicherung von Kohlenstoff
- **Verträge** zwischen dem Staat und den Entwicklern von Swiss NET-Projekten über die Bereitstellung von negativen Emissionen zu einem **garantierten Preis** (z.B. Festpreiszahlungen für negative Emissionen oder Differenzverträge)
- **Verbindliche Zielvorgaben** für die Emissionsverringerung und die CO₂-Entfernung (z. B. Rücknahmeverpflichtungen).

Diese Beispiele für politische Instrumente wurden so ausgewählt, dass sie die ganze Palette möglicher politischer Maßnahmen abdecken, die zur Förderung der Einführung von CCUS-Technologien eingesetzt werden können, von regulatorischen Ansätzen über wirtschaftliche Anreize, einschließlich der Schaffung von Märkten und anderen subventions- oder steuerbasierten Anreizen, bis hin zur direkten Finanzierung von F&E-Projekten. Abbildung 40 gibt einen Überblick über diese Ansätze und zeigt mehrere Beispiele für jeden dieser Ansätze.

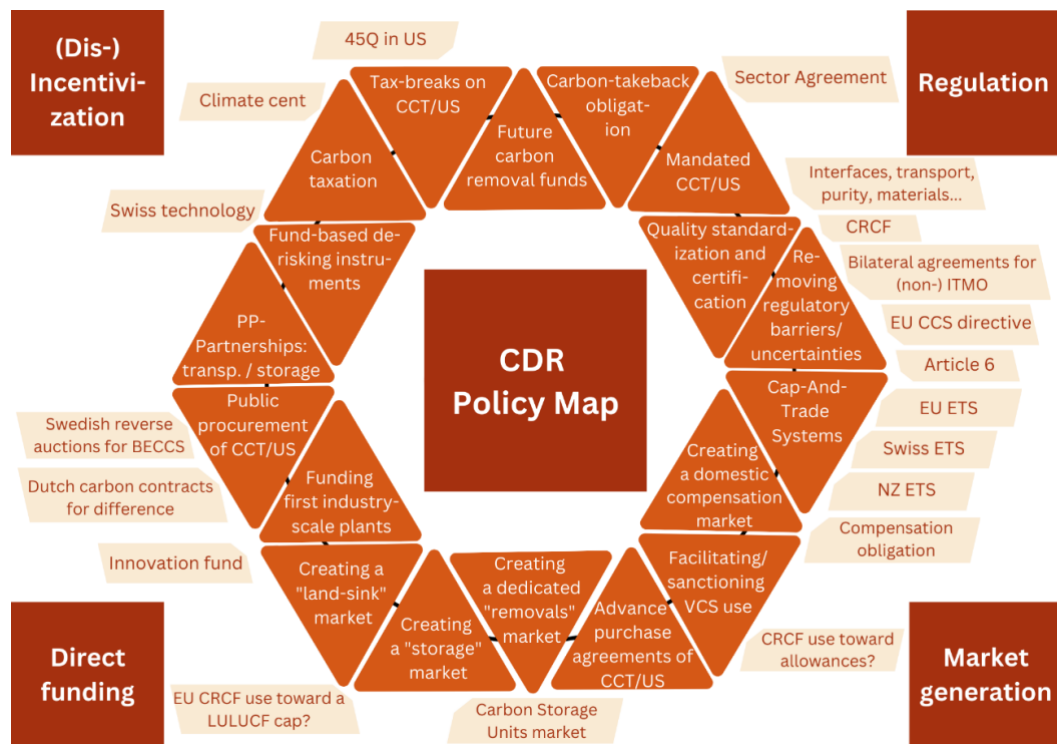


Abbildung 40: Überblick über mögliche Politikinstrumente zur Unterstützung von CCUS-Ansätzen (Pape et al. 2023)

Ergebnisse aus der Umfrage

Um die Umfragedaten zu den Präferenzen der Akteure bzgl. Politikinstrumenten zu analysieren werden zwei Arten von deskriptiven literaturbasierten Statistiken verwendet (Finch 2022). A) Berechnung des mittleren Ranges jeder Politikinstrumentes, wobei ein niedrigerer mittlerer Rang eine positivere Bewertung zeigt. B) Die Berechnung der marginalen Ränge, d. h. wie häufig jedem Politikinstrument ein bestimmter Rang zugewiesen wurde. Dabei ist es sinnvoll, z.B. die obersten und untersten Ränge zu betrachten.

Bei **TCCS** war das bevorzugte Politikinstrument (mit dem niedrigsten Mittelwert) bei allen 40 Antwortenden ein **CO₂ Preis**, und die am wenigsten bevorzugten Maßnahmen waren die Befreiung von der CO₂ Abgabe und Steuergutschriften (Abbildung 41). Generell war die Massnahme, die von allen Befragten am häufigsten als am besten bewertet wurde, der CO₂ Preis, gefolgt von verbindlichen Zielen. Gleichzeitig wurden verbindliche Zielvorgaben jedoch auch am häufigsten als schlechteste Option bewertet (auch wenn sie im Durchschnitt nicht die niedrigste durchschnittliche Bewertung erhielten). Interessanterweise bewerteten die Akteure aus der Kategorie "Sonstige" (einschließlich Forschung, Beratungsunternehmen, Verbände, Investoren und NRO) die verbindlichen Zielvorgaben entweder recht hoch (viermal Rang 1) oder recht schlecht (fünfmal Rang 6). Während der CO₂ -Preis bei den meisten Akteuren (Anbieter von CDR-Dienstleistungen, Regulierungsbehörden und andere) am höchsten bewertet wurde, nannten die Emittenten am häufigsten Verträge über die Bereitstellung negativer Emissionen zu einem garantierten Preis als ihre bevorzugte Wahl. Es ist wahrscheinlich, dass die Emittenten vor allem über die Kosten für die Kompensation unvermeidbarer Emissionen besorgt sind.

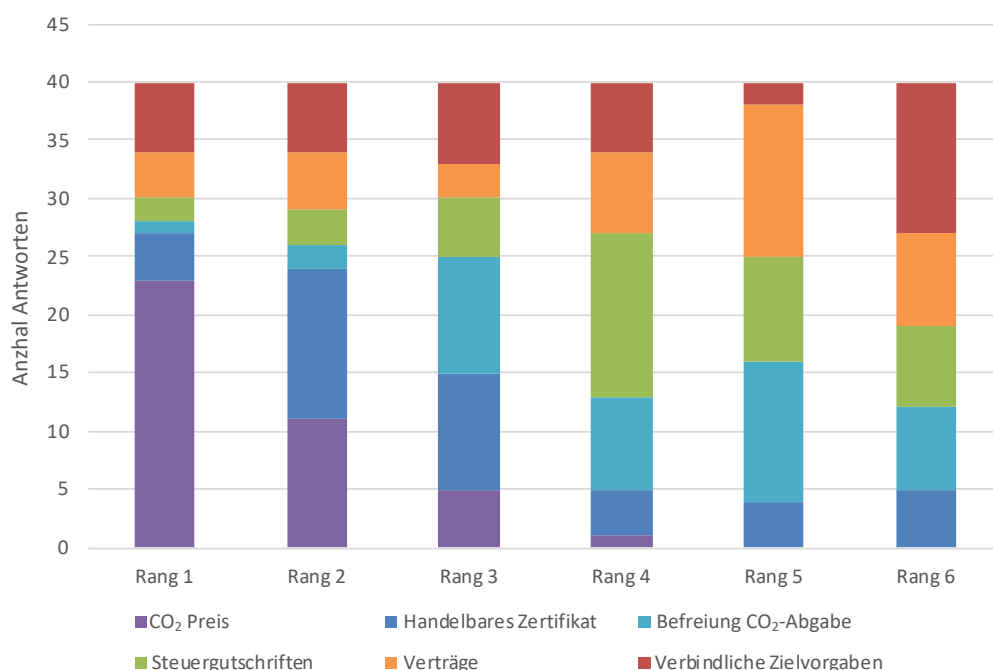


Abbildung 41: Politikinstrument-Ranking für TCCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=40)

48 Befragte bewerteten politische Optionen für **Biochar/Pyrolyse**. Unter ihnen war die bevorzugte Option ebenfalls ein **CO₂-Preis**, und die am wenigsten bevorzugte Option waren Steuergutschriften. Im Gegensatz zu vorher wurden **verbindliche Zielvorgaben** am häufigsten von allen Befragten am besten bewertet, gefolgt vom CO₂-Preis (siehe Abbildung 42). Die am schlechtesten bewertete Maßnahme war in diesem Fall die Steuergutschrift. Auch hier gibt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Akteuren. Während die Anbieter von CDR-Dienstleistungen und die Emittenten am häufigsten einen CO₂-Preis als erste Wahl nannten, bevorzugten die Regulierungsbehörden und andere Interessengruppen am häufigsten verbindliche Ziele.

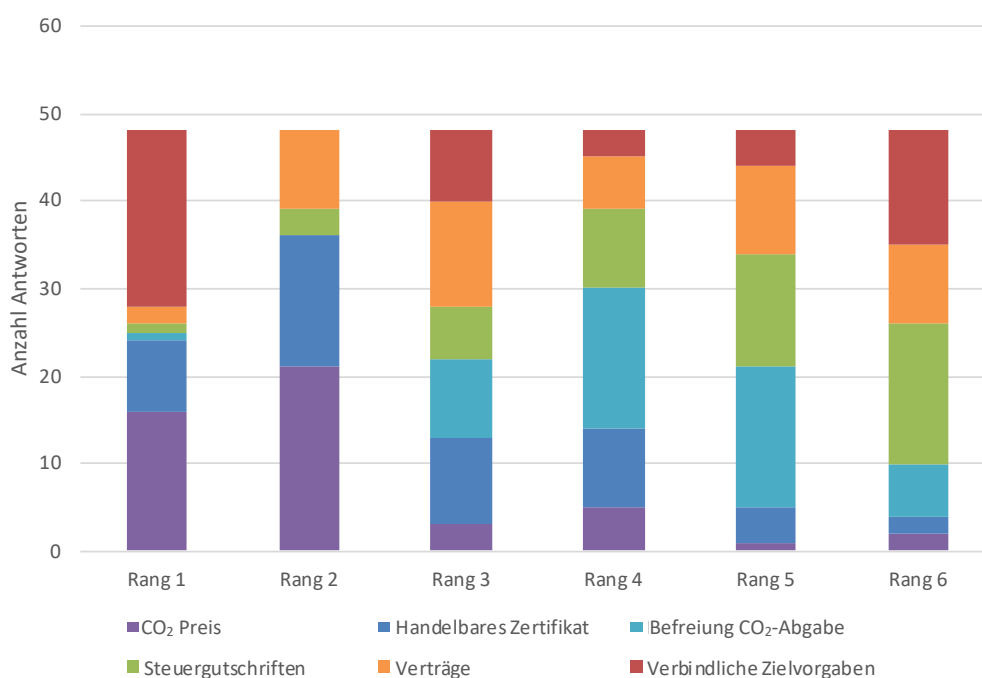


Abbildung 42: Politikinstrument-Ranking für Biochar (Befragte aus allen Interessengruppen, N=48)

Bei **BECCS** war die Politik mit dem niedrigsten Mittelwert aller 55 Befragten wiederum ein **CO₂ Preis**, gefolgt von verbindlichen Zielvorgaben, und die am wenigsten bevorzugte Politik waren Steuergutschriften (Abbildung 43). Wie im Fall von Biochar sehen wir, dass Lieferanten und Emittenten am häufigsten einen CO₂ Preis als erste Wahl nannten, während Regulierungsbehörden und andere Interessengruppen am häufigsten verbindliche Ziele bevorzugten. Im Gegensatz dazu waren für die Emittenten verbindliche Ziele das am wenigsten bevorzugte Politikinstrument. Steuergutschriften scheinen bei Aufsichtsbehörden und anderen Interessengruppen besonders unbeliebt zu sein, aber überraschenderweise stuften auch mehrere Anbieter von CDR-Dienstleistungen Steuergutschriften am niedrigsten ein.

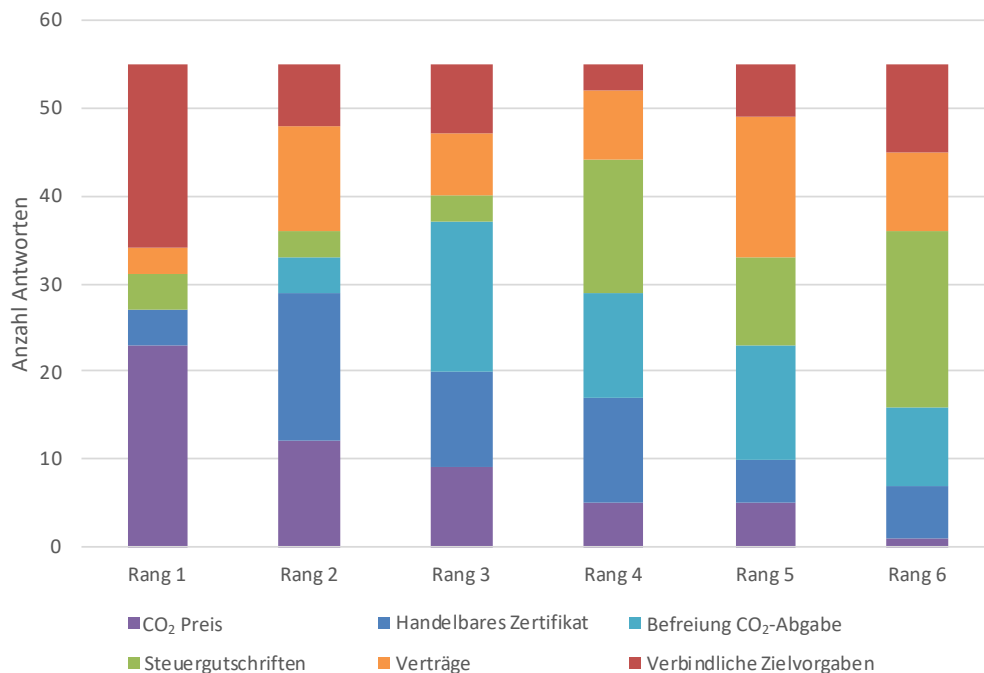


Abbildung 43: Politikinstrument-Ranking für BECCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=55)

Die Umfrageteilnehmer wurden auch gebeten, ihre Präferenzen für **CCS/CCU Politikinstrumente** im Allgemeinen zu nennen. Von den 56 Befragten, die die Optionen für diese Technologien bewerteten, wurde der **CO₂-Preis** am häufigsten als erste Wahl genannt und erhielt auch den niedrigsten Mittelwert (d. h. es war die bevorzugte Politik insgesamt). Obligatorische Zielvorgaben folgen dicht dahinter als zweithäufigste Maßnahme und mit dem zweitniedrigsten Durchschnittswert. Steuergutschriften sind nach beiden Statistiken die am wenigsten bevorzugte Politikenoption (siehe Abbildung 44). Auch hier gibt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Interessengruppen, wobei die Dienstleistungsunternehmen und Emittenten eindeutig die CO₂-Preise bevorzugen, während die Regulierungsbehörden (von denen wir nur einen Befragten für diesen Technologietyp hatten) und andere Interessengruppen am häufigsten verbindliche Ziele bevorzugen.

26 Befragte bewerteten die Politikinstrumente für **DACCS**. Am besten schnitten dabei im Durchschnitt **verbindliche Zielvorgaben ab**, gefolgt von einem CO₂-Preis. Beide Maßnahmen wurden gleich häufig auf den ersten Plätzen genannt. Die am wenigsten bevorzugte Option war die Befreiung von der CO₂ Abgabe. Die am schlechtesten bewerteten Maßnahmen waren die Befreiung von der CO₂ Abgabe und Steuergutschriften (Abbildung 45). Interessanterweise wählten die beiden Anbieter von CDR-Dienstleistungen, die diese Frage beantworteten, Steuergutschriften und Verträge als ihre bevorzugte Politikoption, gefolgt vom CO₂ Preis oder verbindlichen Zielen auf Platz 2. Die von ihnen am wenigsten bevorzugte Option war eine Befreiung von der CO₂ -Abgabe. Interessant ist auch, dass nicht nur die Regulierungsbehörden, sondern auch die Emittenten am häufigsten verbindliche Zielvorgaben als die beste Politik zur Förderung von DACCS ansehen. Im Falle der Emittenten unterscheidet sich dies von ihren Präferenzen in Bezug auf BECCS, Biochar und CCS/CCU. Ebenfalls im Gegensatz zu früheren

Ergebnissen nennen andere Interessengruppen bei DACCS am häufigsten CO₂ Preise, dicht gefolgt von Verträgen, als ihre bevorzugte Förderpolitik.

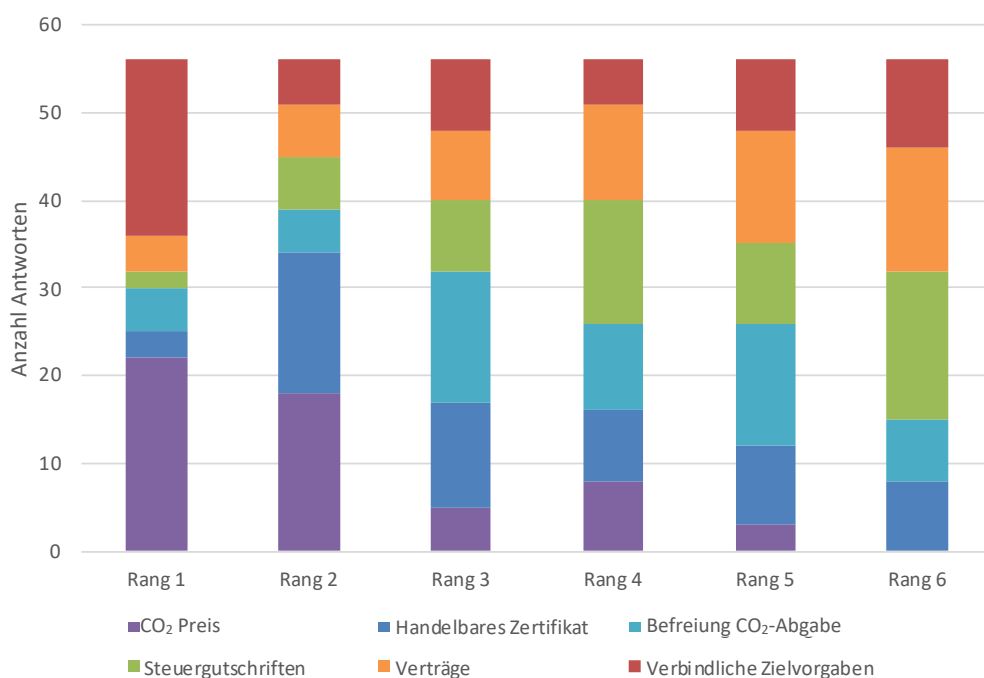


Abbildung 44: Politikinstrument-Ranking für CCS/CCU (Befragte aus allen Interessengruppen, N=56)

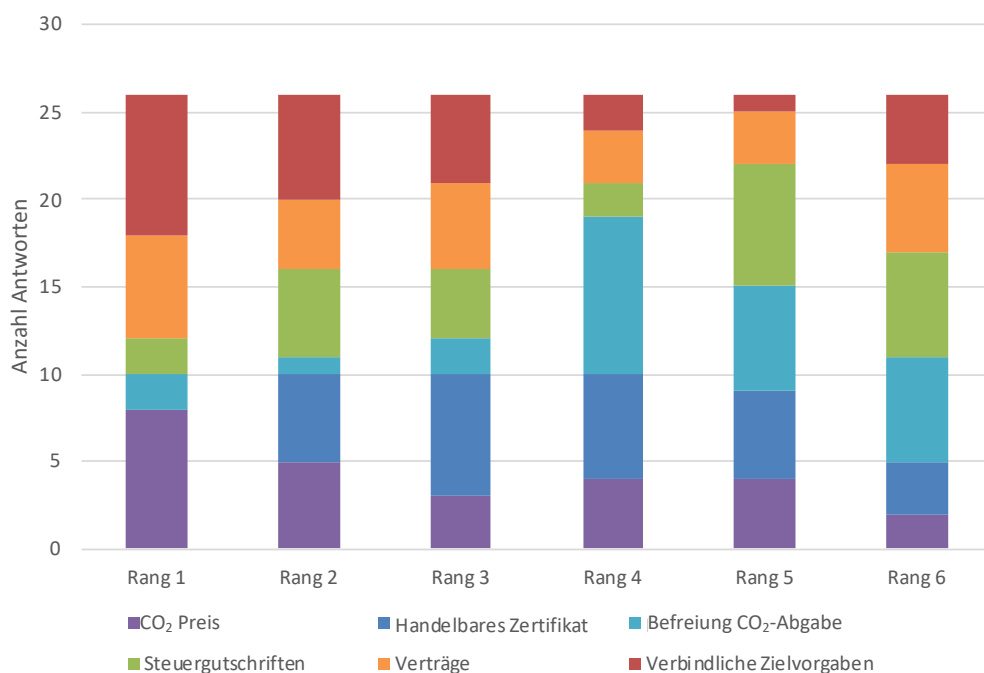


Abbildung 45: Politikinstrument-Ranking für DACCS (Befragte aus allen Interessengruppen, N=26)

Schließlich wurden die Befragten auch gebeten, die Politikinstrumente für biologische CCUS-Ansätze zu bewerten. 27 Personen beantworteten diese Frage. Während die **CO₂ Preise** die beste durchschnittliche Bewertung erhielten, wurden **verbindliche Ziele** am häufigsten als bevorzugte Wahl genannt. Steuergutschriften erhielten die schlechteste durchschnittliche Bewertung, und sowohl Steuergutschriften als auch Verträge waren die am schlechtesten bewerteten Maßnahmen (Abbildung 46). Während verbindliche Zielvorgaben von den Anbietern, Emittenten (in diesem Fall gleichauf mit

Verträgen) und anderen Akteuren am häufigsten an erster Stelle genannt wurden, wurde der CO₂ Preis von den Regulierungsbehörden am häufigsten bevorzugt.

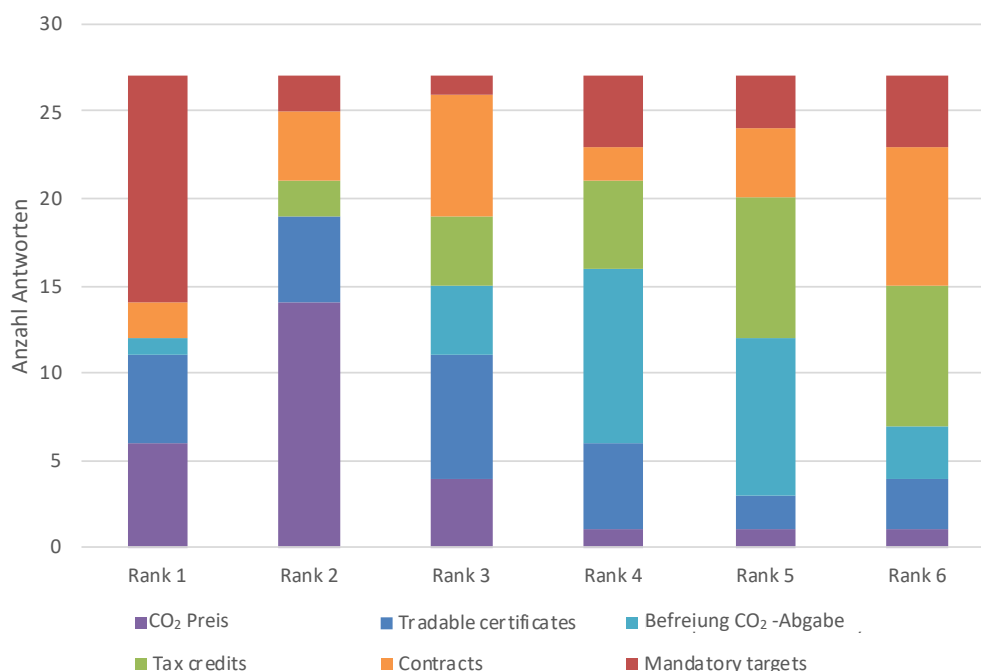


Abbildung 46: Politikinstrument-Ranking für biologische CCUS-Methoden (Befragte aus allen Interessengruppen, N=27)

Insgesamt scheint über alle Technologien hinweg ein **breiter Konsens darüber zu bestehen, dass ein Kohlenstoffpreis ein zentrales politisches Instrument ist**, um die CCUS-Technologien in der Schweiz voranzubringen, aber es besteht **auch große Einigkeit darüber, dass andere Instrumente** erforderlich sind, **insbesondere verbindliche Zielvorgaben**. Während sowohl die Dienstleistungs- und Technologieanbieter als auch die Emittenten eine stärkere Präferenz für Kohlenstoffpreise zu haben scheinen, bevorzugen Regulierungsbehörden und andere Interessengruppen verbindliche Zielvorgaben etwas mehr.

Andere, vielleicht innovativere Politikinstrumente, wie handelbare Zertifikate für die CO₂-Entnahme, Verträge über die Bereitstellung negativer Emissionen zu einem garantierten Preis oder Steuergutschriften, werden von den befragten Akteuren entweder nicht sehr positiv gesehen oder nicht sehr gut verstanden. Insbesondere bei den handelbaren Zertifikaten wurde der Unterschied zu einem allgemeineren CO₂ Preis möglicherweise nicht von allen Befragten verstanden. Interessant ist auch der Fall der Steuergutschriften. Dies ist das Politikinstrument, das am , die bei allen CCUS-Ansätzen und auch von den meisten Interessengruppen am schlechtesten bewertet wurde. Nichtsdestotrotz sind Steuergutschriften das zentrale politische Instrument, das die USA und Kanada eingeführt haben, um den Einsatz von CCUS-Technologien in großem Maßstab zu fördern. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die CCUS-Akteure in der Schweiz **möglicherweise mehr Informationen über alternative politische Instrumente** (über CO₂ Preise und verbindliche Ziele hinaus), ihre Gestaltungsmöglichkeiten sowie ihre Stärken und Schwächen **benötigen**. Wie einige Teilnehmer der Umfrage anmerkten, sind außerdem mehr Informationen über die spezifischen Bedingungen, unter denen die ausgewählten Technologien und/oder politischen Instrumente eingesetzt werden, für eine fundiertere Einstufung erforderlich.

Antworten auf offene Fragen

Über die Einstufung dieser spezifischen politischen Instrumente hinaus wurden die Teilnehmer der Umfrage gebeten, **weitere politische Maßnahmen** zu nennen, die sie für notwendig erachten, um die Entwicklung und Erprobung von CDR-Technologien kurzfristig bis 2030 und ihre breite Einführung bis

2050 zu unterstützen. Wir haben gleiche oder sehr ähnliche Antworten zusammengefasst, gezählt und klassifiziert. Diese Ergebnisse sind im Anhang zu finden. Tabelle 17 fasst die Antworten zu den notwendigen politischen Maßnahmen bis 2030 zusammen, während Tabelle 18 das Gleiche für die politischen Maßnahmen bis 2050 tut.

Zu den am häufigsten genannten politischen Maßnahmen für den Zeitraum **bis 2030** gehören die Bereitstellung finanzieller Unterstützung für Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte, die Sicherung, Unterstützung oder Vereinfachung der Finanzierung von CCUS-Projekten oder -Anlagen sowie die Forderung nach klaren Vorschriften, um stabile Rahmenbedingungen für Investoren zu schaffen. Darüber hinaus forderten viele der Befragten klare Ziele für die CO₂-Reduzierung und -Entfernung sowie vereinfachte Vorschriften (z. B. die Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens für CDR-Anlagen).

Die beiden am häufigsten genannten Maßnahmen **bis 2050** sind die Einführung verbindlicher CDR-Ziele und/oder -Pfade, einschließlich Sanktionen bei Nichteinhaltung und möglicherweise differenziert nach Sektoren, sowie die Bereitstellung einer CO₂ Transport- und Speicherinfrastruktur. Darüber hinaus forderten mehrere Befragte die Einführung von Rücknahmeverpflichtungen, bei denen Unternehmen verpflichtet sind, ihre verbleibenden Emissionen durch CDR-Zertifikate zu kompensieren, verbindliche Emissionsminderungsziele, klare und ausreichende rechtliche Rahmenbedingungen, die Sicherstellung der Unterstützung durch die Bevölkerung, einen kontinuierlich steigenden CO₂ Preis sowie die Stärkung der internationalen Zusammenarbeit, insbesondere mit der EU.

Schließlich wurden die Teilnehmer der Umfrage auch gebeten, **Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus von Transport- und Lagerkapazitäten** vorzuschlagen. Tabelle 19 im Anhang fasst diese Antworten zusammen. Die rechtlichen und regulatorischen Aspekte werden von den Befragten eindeutig am häufigsten genannt, darunter die Schaffung von Klarheit oder die Harmonisierung der rechtlichen Anforderungen für den internationalen CO₂ Transport und der Abschluss bilateraler Abkommen mit Ländern mit Speicherkapazitäten, um Speicherplatz für die Schweiz zu sichern. Aber auch die Suche nach Speicherkapazitäten innerhalb der Schweiz wird von den Befragten als vorrangig eingestuft. Interessanterweise gibt es gegensätzliche Meinungen darüber, ob die Speicherung im Inland oder im Ausland bevorzugt werden sollte. Die Entwicklung der CO₂ Transportinfrastruktur auf nationaler Ebene, einschließlich des rechtlichen Rahmens, der Planung und der Umsetzung, hat ebenfalls Priorität. Während mehrere Befragte dafür plädieren, dass eine solche Infrastruktur von der öffentlichen Hand bereitgestellt werden sollte ("ähnlich wie das Straßennetz"), weisen andere darauf hin, dass der private Sektor der Anbieter sein sollte, allerdings mit Unterstützung (z. B. in Form von Investitionsgarantien). Ein weiterer Aspekt, der mehrfach genannt wurde, ist die Bedeutung der Sicherung der politischen und gesellschaftlichen Unterstützung, sowohl auf nationaler als auch auf lokaler Ebene an den Orten, an denen die notwendige Infrastruktur gebaut werden soll. Schließlich zeigten die Antworten auch eine Debatte über die tatsächliche Notwendigkeit von CO₂ Transport- und Speicherinfrastrukturen, wobei einige Teilnehmer argumentierten, dass ein viel stärkerer Schwerpunkt auf Maßnahmen zur Emissionsreduzierung (einschließlich Suffizienz und Reduzierung des Verbrauchs emissionsintensiver Güter) gelegt werden sollte, während andere betonten, dass die biologische Speicherung (z. B. in Biochar oder in Bauholz) viel mehr Zusatznutzen bietet als die unterirdische Speicherung und daher vor Investitionen in eine solch massive Infrastruktur bevorzugt werden sollte.

Ergebnisse aus dem Workshop

Eine ähnliche Frage zur Einstufung der sechs beschriebenen politischen Optionen wurde während des DeCIRRA-Workshops zu Pseudo-Merit-Order und Politiken und Maßnahmen gestellt, der am 10. Mai 2023 stattgefunden hat. Der Workshop brachte 21 Experten zusammen, darunter Vertreter von Forschungseinrichtungen, aber auch von Start-ups, Müllverbrennungsanlagen, Biocharproduzenten, NGOS, Verbänden und Beratern. Die Experten wurden nach den spezifischen CCUS-Ansätzen gruppiert, die in DeCIRRA untersucht werden, und ihre Antworten stellten den Gruppenkonsens dar. Für BECCS waren die am besten bewerteten politischen Optionen verbindliche Ziele und ein CO₂ Preis, während die am schlechtesten bewertete politische Option handelbare Zertifikate waren. Bei Biochar waren die am besten bewerteten Optionen ebenfalls verbindliche Ziele und CO₂ Preise, die am

schlechtesten bewertete Option waren Verträge. Bei TCCS bewertete die Gruppe den CO₂ Preis und die handelbaren Zertifikate am besten, während Verträge am schlechtesten bewertet wurden (zwei politische Maßnahmen, Steuergutschriften und die Befreiung von der CO₂ Abgabe, wurden von der Gruppe nicht bewertet). Für DACCS schließlich stufte die Gruppe verbindliche Zielvorgaben und handelbare Zertifikate als die beste und die Befreiung von der CO₂ Abgabe als die schlechteste politische Option ein.

4 Outlook

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens sowie die Lücken aufgezeigt in Bezug auf drei Bereiche: a) die Technologien und deren Einordnung (4.1), b) das Policy Screening (4.2), c) Accounting (4.3) zusammengefasst. In jedem Abschnitt wird zudem auf das weitere Vorgehen zur Beantwortung der SP3 Forschungsfragen verwiesen.

4.1 Stand und Wissenslücken bzgl. Technology Screening und CO₂ Removal Cost Curve

Ziel des DeCIRRA SP3 ist es die Frage zu beantworten: Was wäre die effizienteste Kombination aus CCUS und NET, wann wäre der Zeitpunkt jeweils für Investitionen unter der Berücksichtigung internationaler Entwicklungen (z. B. Verfügbarkeit von CO₂-Speicherstätten und H₂-Import)? Wie werden (Co-)Nutzen (z. B. verbesserte Böden durch Biochar) und (Co-)Kosten (z. B. aufgrund von Land- und Wassernutzung) in der Investitionsanalyse berücksichtigt?

Stand Zwischenbericht: Der Zwischenbericht beinhaltet für jeden der vier CCUS Ansätze Kostenschätzungen, wobei diese bei Biochar, BEC, Transport und Speicherung auf der bestehenden Literatur basieren, bei TCCS eigene Schätzungen durch die Projektmitglieder vorliegen und bei DAC eigene Analysen für die Hauptdeterminanten der Kosten, d.h. die regenerative Elektrizitätserzeugung, vorgenommen worden sind. Die Potentialabschätzungen beruhen zum Teil auf eigenen Analysen (TCCS) und zum Teil auf bestehender Literatur, wobei sie für BEC und Biochar stark von der verfügbaren und bei Biochar auch einsetzbaren bzw. erlaubten Biomasse abhängig ist. Für alle Technologien wurden (Co-)Nutzen und (Co-)Kosten identifiziert, die in den folgenden zwei Tabellen (Tabelle 14 und Tabelle 15) zusammengefasst sind.

Tabelle 14: Co-Nutzen der untersuchten CCUS-Technologien

Co-Benefits	Klimarelevante Wirkung	Andere Umweltwirkung	Andere Wirkungen
Biochar	Böden: Verringerung von NO ₂ Erhöhte C-Speicherung durch Mikroben Reduktion von Methan: Kläranlagen, Gülle, Kühe, Reisanbau	Tiere verbessern die Aufnahme von Futtermitteln Verbessertes Wachstum der Pflanzen (durch bessere Wasserspeicherung, Wurzelentwicklung) Reduktion von schlechten Gerüchen, Mikroplastik, toxischen Substanzen	Füllt die Risse im Beton
TCCS	Verbessertes Wachstum der Bäume Verbessert die Klimabeständigkeit der Wälder Geringeres Risiko einer Umkehrung der Erfassung aufgrund von Waldbränden (Häuser sind besser gegen Feuer geschützt als Holz in Wäldern)	Verbesserte Artenvielfalt Weniger Abfall von Baumaterialien	Substitutionseffekt (Stahl, Zement)
BECCS	Viel höhere CO ₂ Konzentrationen im Vergleich zu DACCS, daher geringerer Energiebedarf Doppelter systemischer Nutzen (flexible Energiespeicherung oder negative Emissionen)	Bessere Luftqualität, wenn neben CO ₂ auch andere Schadstoffe aufgefangen werden	Die Industrie wird unabhängiger und flexibler, z.B. von Kohlenstoffimporten, wenn die Produktion synthetischer Energie mit abgeschiedenem CO ₂ erfolgt
DACCS	Es ist kein Langstreckentransport von CO ₂ erforderlich, wenn es am Speicherort abgeschieden wird, was den Energiebedarf für den Transport verringert.	Bessere Luftqualität, wenn neben CO ₂ auch andere Schadstoffe aufgefangen werden	Die Industrie wird unabhängiger und flexibler, z.B. von Kohlenstoffimporten, wenn die Produktion synthetischer Energie mit abgeschiedenem CO ₂ erfolgt.

Tabelle 15: Co-Risiken der untersuchten CCUS-Technologien und Infrastrukturbedarf

Co-Risiken	Klimarelevante Wirkung	Andere Umweltwirkung	Andere Wirkungen
Biochar	Risiko der Entwaldung Übernutzung von Wäldern bei nicht nachhaltiger Rohstoffbeschaffung Unsachgemäße Pyrolyseprozesse oder Biochar-Nutzung Risiko, dass gespeicherter Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre gelangt	Geringerer Ertrag durch geringere Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffverfügbarkeit durch erhöhte Säurepufferung in den behandelten Böden und potenziell ökotoxische Wirkung Negative Auswirkungen auf die Gesundheit durch und erhöhte Stofffreisetzung	
TCCS	Risiko der Entwaldung bzw. Übernutzung von Wäldern bei nicht nachhaltiger Rohstoffbeschaffung Zunahme von Wärmeverbünden, die mit Holz betrieben werden, führt zu Knappheit an Energieholz und könnte dazu führen, dass nicht Restholz verbrannt wird.		
BECCS		Chemische Hilfsmittel (z.B. Amine) sowie der Verlust von Treibhausgasen in die Atmosphäre (z.B. Methanschleupf)	Hoher Energiebedarf für Abscheidung kann zu Versorgungslücken führen, von z.B. thermischer und elektrischer Energie
DACCS		Flächennutzung, Wasserverbrauch und mögliche Freisetzung von Chemikalien, die bei der Abscheidung und Lagerung verwendet werden	
Pipeline	Leckagen an der Pipeline	Verunreinigung des Grundwassers	
Lagerung	Höherer Konsum von fossiler Energie durch Preisreduktion durch Verpressung von CO ₂ in Öllagerstätten Leckagen im Reservoir oder beim Einblasen	Verunreinigung des Grundwassers	Seismisches Risiko (für Erdbeben) aufgrund der CO ₂ -Injektion in das Reservoir.

Eigene Analysen zu den Investitions- und laufenden Kosten für Biochar und BEC sollten zusammen mit den Implementierungspartner weiterentwickelt und geschätzt werden und verschiedene Varianten für die Zuteilung dieser Kosten auf die zum Teil simultan erzeugten Produkte sollten durchgeführt werden. Bei den Potentialen werden auch die Szenarienanalysen weitere Informationen liefern, hierzu wird ein eigener Workshop im November 2023 durchgeführt.

Auf Basis des Technology Screening soll am Ende des Projektes eine so genannte «Pseudo Merit Order» oder «CO₂ Removal Cost Curve» (CO₂-Entfernungskostenkurve) erstellt werden. Diese stellt graphisch das Potential und die Kosten für CCUS bzw. NET und Emissionsreduktions-Massnahmen dar. Jeder Balken stellt dabei eine einzelne Massnahme bezogen auf ihren Beitrag an Minderung dar. Auf der Abszisse werden die kumulierten jährlichen Potentiale und auf der Ordinate die jeweiligen spezifischen Kosten aufgetragen. Dabei umfassen Minderungen auf der linken Seite negative Emissionsansätze wie Biochar, Holzbau, BECCS und auf der rechten Seite Reduktionsansätze wie CCS, die wie eine Reduktionskurve sortiert sind.

Dabei werden die einmaligen Investitions- sowie die laufenden Kosten im Vergleich zum Referenzfall für ein bestimmtes Jahr in der Zukunft (z.B. 2030, 2035, 2050) einbezogen. Es findet keine Grenzkostenbetrachtung statt, daher auch der Name Pseudo Merit Order. Die Investitionen und Einsparungen werden dabei als Barwert abgezinst. Wenn die Einsparungen die Investitionen übertreffen, handelt es sich um negative Kosten, die unterhalb der Abszisse liegen. Bestimmte

Negativemissionsmassnahmen führen zudem zu indirekten Einsparungen, sogenannte Co-Benefits (z.B. Düngemiteleinparungen durch Biochar), die separat ausgewiesen werden.

Es handelt sich bei dieser Betrachtung um eine gesamtwirtschaftliche Perspektive und es wird daher versucht alle positiven und negativen gesellschaftlichen Wirkungen (Co-Benefits und zusätzlichen Risiken) einzubeziehen, soweit sie sich quantifizieren lassen. Diese werden separat ausgewiesen je nachdem, ob es sich um Negativemissionen oder Reduktionen von Treibhausgasen handelt.

Je nach Ansatz gibt es signifikante Unterschiede zwischen nationalem und internationalem Potential bzw. der Kosten, deshalb muss auch hier differenziert werden. Die Schweiz verfügt, wie in Kapitel 2.7 aufgezeigt, nur über ein begrenztes geologisches Speicherpotential. Das Potential der CCS-Ansätze hängt also wesentlich davon ab, ob Speicherkapazitäten im Ausland einbezogen werden können. Tabelle 16 fasst aus den verschiedenen Kapiteln zusammen, was für ein technisches Potential mit jeder der betrachteten CCUS Technologien innerhalb der Schweiz erreicht werden könnte.⁶⁶

Tabelle 16: Potentiale der untersuchten CCUS-Technologien

	Biochar	Holzbau (TCCS)	BEC(CS)	CO ₂ Speicherpotential
CO ₂ Speicherpotential (Mio. tCO ₂ e)	1.5 - 2.2 pro Jahr	CH Holz: 1.2 pro Jahr Kumuliert: 36 bis 2050 CH Import: 3.52 pro Jahr Kumuliert: 103 bis 2050	CCS Zement: 2.4 pro Jahr (10% biogen) KVAs: 4.4 pro Jahr Holzkraftwerke: ? ARA: 0.17 pro Jahr Chemie: 0.75 Raffinerie: 0.3	Schweiz: 52 in 2040? Europa: 102 in 2035, davon: - Niederlande: 8.7 - Italien: 10 - Dänemark: 7 Offshore Potential: - Norwegen / UK: 160'000 (langfristig)
Ausgangsmaterial	2.8 Mio. t Trockensubstanz	CH Holz: 2.1 bis 3.15 Mio. m ³ Holz CH Import: 8.3 Mio. m ³ Holz	Abfälle und Holz	-
Einflussfaktoren	Rahmenbedingungen darüber, welche Ausgangsmaterialien nutzbar sind	Holzverfügbarkeit im In- und Ausland Sägerei-Kapazität, z.B.: auch für Laubbaumholz Bautätigkeit (Zinsen, Standards, ...)	Kreislaufwirtschaft Holzverfügbarkeit Abscheidung: Platz, Wärme, Strom, Transport an Punktquelle	Bilateral Abkommen für CO ₂ Transport und Speicherung Standardisierung und regulatorische Rahmenbedingungen

Die Darstellung in Form einer CO₂ Removal Cost Curve (siehe Abbildung 47) hat den **Vorteil**, dass sie durch die Stufendarstellung aufzeigt, bei welchen Ansätzen welche Politikinstrumente geeigneter sind (siehe Grubb et al. 2013):

- Massnahmen, die aus gesamtgesellschaftlicher Sicht bereits wirtschaftlich wären, also ganz links sind, da sie negative Kosten ausweisen, z.B. durch hohe Energieeinsparungen oder sehr lohnenswerte Co-Benefits, sollten eigentlich ohne Förderung in Gang kommen. Sie benötigen trotzdem teilweise politische Interventionen, z.B. den Abbau bestehender Hemmnisse wie

⁶⁶ DACCS wird nicht separat erwähnt, weil da das Potential nur von den Speicherkapazitäten abhängt, in Kontrast zu den anderen Technologien dessen Potential auch von weiteren Ressourcen abhängig ist.

Regulierung oder die Anrechnung von noch nicht eingepreisten negativen externen Effekten. Z.B. können negative Auswirkungen von Düngemittleinsatz hohe Kosten verursachen. Wenn diese eingepreist würden, wäre Biochar wirtschaftlicher.

- Massnahmen, bei denen eine Preisdifferenz vorliegt (welche also in der Mitte des Graphs links und rechts der y-Achse liegen). Dort wären Instrumente von Vorteil, die diese Preisdifferenz überwinden (CO₂-Abgabe oder Emissionshandelspreis), bzw. vielleicht müssen schon bestehende Instrumente angepasst werden. Zum Beispiel wird derzeit bei BECCS nur eine «neutrale» Wirkung im Schweizer Emissionshandel berücksichtigt, aber keine negativen Emissionen.
- Massnahmen, die sich noch am Anfang ihrer Lernkurve befinden und noch keine Skalierung aufweisen, haben erhebliche Mehrkosten und liegen ganz rechts auf der x-Achse. Diese sind auf grosse (staatliche) Unterstützung angewiesen. Gründe können auch eine fehlende Infrastruktur (z.B. CO₂ Pipeline) sein, so dass eine Förderung auch in der Koordination und Bereitstellung dieser Infrastruktur sein könnte. Auch staatliche Eingriffe in Form von Bürgschaften zur Senkung des Investitionsrisikos oder Politiken, die weitere Innovationen unterstützen (z.B. Subventionen) sind geeignet.

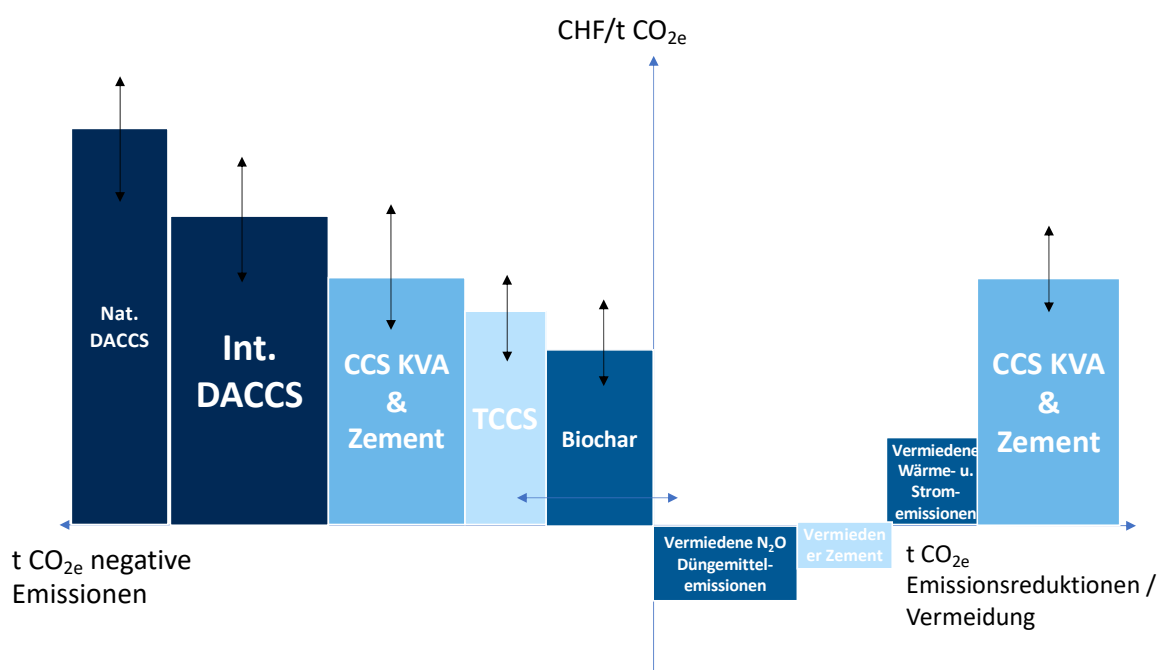


Abbildung 47: Skizze einer CO₂ Removal Cost Curve

Diese Form der Darstellung hat jedoch auch den grossen **Nachteil**, dass sie die Überlappung der Techniken nicht berücksichtigt. So wird das Gesamtpotential überschätzt, da zum Beispiel die verfügbare Biomasse (insbesondere Energieholz) mehrfach ausgewiesen wird, sowohl im Potential für Biochar und wie auch für BECCS. Daher ist es notwendig in einem nächsten Schritt mit Szenarien zu rechnen, die diese Doppelzählungen vermeiden, indem sie klare Zuweisungen machen und somit die verfügbare Biomasse nur einmal einsetzen.

4.2 Policy Screening, regulatorische Lücken und Ausblick auf zusätzliche Politikinstrumente

Die Analyse zeigt einerseits, dass es große Unterschiede in der Einstellung der verschiedenen Akteure zu Politikinstrumenten gibt. Dies beispielsweise in Bezug auf die Frage ob verbindliche Ziele wünschenswert sind, was von Regulierungsbehörden, Lieferanten und anderen Akteuren bejaht wird, aber nicht von den Emittenten. Gewisse Massnahmen wie freiwillige oder obligatorische handelbare

Zertifikate für CO₂-Entfernung oder Emissionsminderungen, Verträge für die Bereitstellung negativer Emissionen zu einem garantierten Preis oder Steuergutschriften scheinen nicht so populär zu sein, was auch darauf zurückzuführen sein könnte, dass sie von der CCUS-Gemeinschaft nicht so gut verstanden werden. Insbesondere die verschiedenen Standards und Methoden, die auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene für den CO₂-Handel entwickelt werden, werden von DeCIRRA in Zukunft genau verfolgt werden. Dazu gehört auch die Frage, wie die Zusätzlichkeit in diesen Standards definiert wird, insbesondere im Falle der Anrechnung (sub-)sektoraler kumulativer Ergebnisse anstelle von Einzelprojekten.

Die Literatursauswertung sowie die Interaktionen mit den Akteuren im Bereich von CCUS und insbesondere auch NETs zeigt drei zentrale regulatorische bzw. politische Lücken auf, die der Skalierung im Weg stehen:

1. Sicherheit der Einnahmen aus der Erfüllung des öffentlichen Gutes Klimaschutz
2. Klarheit der Aufgabenverteilung zwischen Bund, Kantonen und Privatwirtschaft
3. Eindeutige Regeln für die konsistente Sektor- und Länderübergreifende Quantifizierung und Zurechnung von von CO₂-Entfernung oder Emissionsminderungen

Punkt 1. scheint den kapitalintensiven Ansätzen, welche auf Abscheiden, Transport und Speicherung von CO₂ abstützen bis heute weltweit im Weg zu stehen, da in Ermangelung eines robusten Kohlenstoffmarktes mit sehr sicher absehbaren und genügend hohen CO₂-Preisen nur staatliche Subventionen, Garantien oder regulatorische Zwänge wirksam werden.

Punkt 2. wird da problematisch, wo es um die Ausarbeitung kooperativer Grossprojekte geht, wie die Entwicklung von CO₂-Pipelines, welche inländische CO₂-Quellen unterschiedlichster Art mit ausländischen Transportmitteln verbinden.

Punkt 3. kann den beiden vorangehenden Punkten insofern als weitere Herausforderung im Weg stehen, als ein gemeinsames Verständnis von Eigentumsverhältnissen und Finanzflüssen eine Voraussetzung für eine klare Aufgabenteilung und Einkommenssicherheit ist.

In einem nächsten Schritt werden daher im Rahmen von DeCIRRA weitere Details zu möglichen Politikinstrumenten sowie künftiger Policy-Mixes zur Unterstützung des CCUS in der Schweiz entwickelt. Der Prozess und die Kriterien zur Bewertung der Politiken oder Policy-Mixes werden im Folgenden erläutert.

Die Anwendbarkeit von Politikinstrumenten richtet sich nach dem Reifegrad der Technologie, auf die sie angewendet werden soll. Neuere Technologien benötigen in der Regel gezielte Unterstützung für Pilot- und Demonstrationsprojekte, während ausgereifere Technologien Unterstützung benötigen, um im Vergleich zu anderen CCUS-Technologien wettbewerbsfähig zu werden. Mit der Zeit wird diese Unterstützung abnehmen, da Skaleneffekte erzielt werden. Wir folgen der Roadmap des Bundesrates für die Skalierung von CCUS-Technologien und gehen davon aus, dass bis 2030 vor allem politische Maßnahmen zur Unterstützung der frühen Pilot- und Demonstrationsprojekte erforderlich sind, während ab diesem Zeitpunkt eine Verlagerung hin zu politischen Maßnahmen zur Diffusion und zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit notwendig sein werden.⁶⁷ Wir werden für die Bewertung die folgenden Kriterien anwenden (von Honegger et al. abgeleitet (2021, 2022)):

- **Die Wirksamkeit** bezieht sich auf die Fähigkeit des Politikinstrumentes, das angestrebte Ziel zu erreichen (plus alle unerwarteten Nebeneffekte) (Nagel 1986) in diesem Fall die Förderung des Einsatzes von CCUS, aber letztlich auch die Erreichung des Netto-Null-Emissionsziels bis 2050. Die Wirksamkeit kann von verschiedenen Gestaltungselementen einer Politik abhängen. Ohne andere politische Maßnahmen können die Kohlenstoffpreise beispielsweise nur dann Anreize für die Einführung von CCUS schaffen, wenn sie hoch genug sind, um die Kosten für die Emissionsminderung zu decken.
- **Die Effizienz** bezieht sich auf die Fähigkeit eines Politikinstrumentes, das Emissions- oder CCUS-Ziel mit den geringsten Kosten zu erreichen (d. h. ein maximales Ergebnis für einen gegebenen finanziellen Aufwand). Sie kann entweder anhand der Gesamtkosten oder anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses bewertet werden (Nagel 1986). Die Effizienz wird idealerweise aus einer dynamischen Optimierungsperspektive bewertet, wobei

⁶⁷ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/info-specialists/co2-capture-removal-storage.html>

Rückkopplungen mit der Gesamtwirtschaft berücksichtigt werden. In diesem Projekt wird die Effizienz nur auf qualitative Weise bewertet werden.

- **Verteilung der Kosten:** Wer die Kosten (und den Nutzen) trägt, die sich aus der Einführung verschiedener politischer Maßnahmen und Vorschriften ergeben, ist eine entscheidende Frage, die über ihre Fairness und politische Akzeptanz entscheidet. Subventionen, Steuernachlässe und andere unterstützende Maßnahmen werden in der Regel aus dem Staatshaushalt finanziert, so dass letztlich alle Steuerzahler die Kosten tragen. Politische Maßnahmen, die einen Preis für Kohlenstoff festlegen, basieren dagegen auf Kosten, die den Herstellern emissionsintensiver Güter belastet werden, die sie dann an ihre Verbraucher weitergeben (Polluter Pays Principle).
- **Politische Durchführbarkeit:** Aufgrund des direktdemokratischen Systems der Schweiz braucht jede Politik eine breite Unterstützung durch politische Parteien, relevante Interessengruppen und die Öffentlichkeit, um machbar zu sein. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass politische Maßnahmen, die zusätzliche finanzielle Belastungen für die Gesellschaft mit sich bringen - insbesondere Steuern und Abgaben - von der Bevölkerung eher abgelehnt werden, während Maßnahmen, die eher unterstützend wirken - wie etwa Subventionen - eine breitere Akzeptanz finden. Die Akzeptanz von politischen Instrumenten wie auch die daraus folgenden Verteilungseffekte, die beide die politische Durchführbarkeit beeinflussen, wird innerhalb von DeCIRRA durch eine Umfrage zu bewerten versucht.
- **Kohärenz mit dem bestehenden schweizerischen und dem geltenden internationalen Rechtsrahmen:** Die Schweiz verfügt bereits über mehrere klimarelevante Gesetze und Instrumente, darunter die CO₂ Abgabe auf thermische Brennstoffe (Erdgas und Heizöl), das ETS für Grosse emittenten und die CO₂ Kompensation für Importeure von Treibstoffen. Darüber hinaus ist das schweizerische EHS mit dem EU-EHS verknüpft, so dass die beiden Regelwerke eng aufeinander abgestimmt sind, insbesondere in Bezug darauf, welche Arten von Anlagen teilnehmen und welche Arten von Einheiten gehandelt werden dürfen. Schliesslich ist die Schweiz Vertragspartei des Pariser Abkommens, so dass die Bestimmungen über Kooperationsvereinbarungen gemäss Artikel 6 des Pariser Abkommens auf CCUS-Projekte anwendbar sind, die eine Zusammenarbeit zwischen der Schweiz und anderen Ländern beinhalten. Dieses Kriterium wird nur bei der Bewertung der in anderen Ländern angewandten Maßnahmen herangezogen.
- **Grad der technologischen Spezifität:** Es gibt eine Debatte über die potenzielle Auswirkung von Politikinstrumenten auf technologischen Lock-in, der das Risiko bergen kann, Technologien auszuschließen, die längerfristig überlegen (effektiver und/oder effizienter) werden könnten (T. S. Schmidt et al. 2016). Politiken, die eher technologiespezifisch sind (d. h. die auf die Unterstützung einer bestimmten Art von Technologie ausgerichtet sind), führen mit größerer Wahrscheinlichkeit zu solchen Lock-ins. Andererseits kann eine solche gezielte Unterstützung aber auch erforderlich sein, um das Lernen in weniger ausgereiften Technologien zu fördern. Generell ist jedoch ein gewisses Maß an technologischer Vielfalt wünschenswert, um die Widerstandsfähigkeit des Systems zu erhöhen und auf unvorhergesehene negative Auswirkungen einzelner Technologien reagieren zu können.
- **Risiken von Leckagen und Doppelzählungen:** Leckagen und Doppelzählungen sind spezifische Risiken im Zusammenhang mit der Klimapolitik. In diesem Zusammenhang bezieht sich Leakage auf die Verlagerung von Emissionen oder emittierenden Aktivitäten an Orte außerhalb des Geltungsbereichs einer bestimmten Politik, wie etwa einer Kohlenstoffsteuer oder eines Emissionshandelssystems. Wenn Emissionsquellen in andere Länder verlagert werden, anstatt die Emissionen mit technischen Mitteln tatsächlich zu reduzieren (oder einzufangen), dann hat keine wirkliche Reduzierung stattgefunden (Kreibich und Hermwille 2016). Doppelzählung bezieht sich auf das Risiko, dass Emissionsreduktions- oder -Entfernungseinheiten auf die Erfüllung von mehr als einem Emissionsreduktionsziel angerechnet werden können (Schneider et al. 2019). Insbesondere bei grenzüberschreitenden Aktivitäten, bei denen CO₂ in einem Land abgeschieden und zur Speicherung in ein anderes Land transportiert wird, muss durch Regelungen geklärt werden, auf welcher Seite die entsprechenden CO₂-Entfernung angerechnet werden darf.
- **Flexibilität im Hinblick auf künftige Unsicherheiten:** Da nicht ausreichend bekannt ist, wie schnell NETs Kostensenkungen erreichen werden, wie stark die Kohlenstoffpreise steigen werden oder ob neue Minderungs-Technologien auftauchen werden, muss die Förderpolitik flexibel gestaltet werden, um auf sich ändernde zukünftige Umstände reagieren zu können. Sobald bestimmte Technologien Marktreife erlangt haben und bei bestimmten Kohlenstoffpreisen wettbewerbsfähig sind, kann eine gezieltere Förderung beispielsweise reduziert oder eingestellt werden.

In künftige Arbeiten im Rahmen des Projekts wird ein Modell zur quantitativen Bewertung der Verteilungseffekte der Maßnahmen genutzt, Geschäftsmodelle für die Förderung bestimmter CCUS-Optionen in bestimmten Wirtschaftssektoren entwickeln und eine repräsentative Umfrage zur Bewertung der Akzeptanz solcher Maßnahmen und Technologien in der Schweizer Bevölkerung durchgeführt. Aus diesem Grund ist dieses Politik-Screening nur ein erster Schritt hin zu einer umfassenderen Bewertung des optimalen Policy-Mixes für die Einführung von CCUS-Optionen in der Schweiz.

4.3 Ausblick bezüglich der Weiterentwicklung von Bilanzierungsansätzen

Ein weiteres Ziel von SP3 des DeCIRRA-Projekts ist es, zentrale Fragen zur Bilanzierung von CCUS und NETs zu beantworten: Welche Bilanzierungs- und Umsetzungsrahmen bestehen national und international, um Investitionen zu unterstützen, und welche Änderungen müssen vorgenommen werden, um Anreize für Investitionen in CCUS und NET in der Schweiz zu schaffen, unter Berücksichtigung von Doppelzahlungen und Risiken der Nicht-Dauerhaftigkeit sowie von Unsicherheiten in Bezug auf Leckagen? In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Stand der bestehenden Anrechnungsregeln für die verschiedenen Technologien bewertet. Es wurden jedoch mehrere Lücken und Herausforderungen festgestellt, die in Zukunft weiter analysiert werden sollen.

Die richtige Quantifizierung der CO₂-Entfernung und deren Nachverfolgbarkeit wird durch eine Reihe von konzeptionellen Herausforderungen erschwert. Erstens besteht ein grundlegender Unterschied zwischen der aktiven Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre, die zu einer Verringerung der atmosphärischen Temperatur führt, und der Verringerung von Emissionen aus anderen Quellen, die "nur" die weitere Erwärmung verringert; zweitens hängt die Menge immer von einer kontrafaktischen Annahme oder einer Grundannahme bezüglich der substituierten Produkte oder Dienstleistungen ab. Diese Annahme hängt von fallspezifischen Randbedingungen ab und kann sich je nach geografischem Gebiet im Laufe der Zeit ändern. Ein Beispiel zur Veranschaulichung wäre die Substitution von Strom und Wärme bei Nebenprodukten der Biocharproduktion. Zur Quantifizierung des CO₂-Minderungseffekts ist dabei eine Annahme über das Strom- bzw. Wärmemix nötig.

Eine der größten Lücken in der Bilanzierung von Emissionsminderungen oder CO₂-Entfernung durch Aktivitäten, die Biomassenutzung und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) beinhalten, ist die mangelnde konzeptionelle Klarheit darüber, wo die Ergebnisse erzielt werden. Die Abgrenzung zwischen der **Bilanzierung von nationalen Treibhausgasinventaren (THG) und projektbezogenen Aktivitäten** ist nach wie vor unklar. Dies wird besonders komplex, wenn man den Vorschlag in Betracht zieht, die Akkumulation von Sub-Pool-Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten (HWP) wie Holz anzurechnen. Während nationale Treibhausgasinventare die Gesamtemissionen und deren Reduktion bzw. die CO₂-Entfernungs-Ergebnisse eines Landes widerspiegeln sollen, ist die projektbezogene Bilanzierung im Allgemeinen detaillierter und konzentriert sich auf den Beitrag einzelner Projekte zur Verringerung der Treibhausgase. Diese Zweiteilung erschwert die Schaffung eines kohärenten und allgemein akzeptierten Bilanzierungsrahmens und ist häufig Gegenstand von Unstimmigkeiten und Auslegungsspielraum. Daher muss eine systematische Bewertung der Risiken und Chancen, die sich aus diesen unterschiedlichen Ebenen der Anrechnung ergeben, Teil der künftigen DeCIRRA-Arbeit sein.

Am Beispiel von Biochar müssen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie unterscheidet sich die Bilanzierung im nationalen Treibhausgasinventar im Vergleich zu projektbasierten Aktivitäten, die unter Artikel 6.4 (Compliance-Märkte), den Schweizer Regelungen oder auf den freiwilligen Märkten gehandelt werden?
- Wird es einen Unterschied geben, abhängig von:
 1. den Inputs für die Biocharproduktion (z. B. Holz basiert auf geernteten Holzprodukten),
 2. der nationalen oder grenzüberschreitenden Beschaffung der Inputs (z. B. welche Methoden in anderen Ländern verwendet werden), oder

3. der Art der Verwendung des Biochars (z. B. in Böden, in Baumaterialien, als Ausgangsmaterial)?
- Wem gehören die erzielten Emissionsminderungsvorteile des HWP, wenn Erfüllungsmärkte wie «Senkeschweiz» in der Schweiz und der freiwillige Markt nebeneinander bestehen? Wie können Substitutionseffekte (z. B. Holzbau als Ersatz für Zement oder Stahl) berücksichtigt werden, ohne dass es zu einer Doppelzählung kommt (da Stahl und Zement unter das EHS fallen und somit das Emissionsbudget reduziert würde)?

Ein weiteres großes Hindernis ist das Fehlen klarer Methoden zur **Bewertung der mit der Waldbewirtschaftung verbundenen vorgelagerten Emissionen und des Kohlenstoffgehalts von Holzprodukten unter Berücksichtigung potenzieller Landnutzungsverschiebungseffekte**. Der Kohlenstoffgehalt von Holzprodukten ist ein wichtiger Parameter, der genau erfasst werden muss, da er je nach den bei der Holzernte angewandten Bewirtschaftungsmethoden und den daraus resultierenden Landnutzungsänderungen variieren kann. Ohne eine solide Methodik für vorgelagerte Emissionen und Landnutzungsänderungen ist es schwierig, definitiv zu sagen, ob ein bestimmtes biomassebasiertes Projekt wirklich zum Klimaschutz beiträgt oder das Problem ungewollt verschlimmert. Darüber hinaus gibt es einen Standard zur Anrechnung von Emissionsminderungseffekten durch die Substitution von Holzprodukten als Ersatz für Produkte mit hohen Emissionen, z. B. im Bauwesen. Diese neue Verified Carbon Standard (VCS)-Methode befindet sich noch im Anfangsstadium.

Ein übergreifendes Problem besteht darin, dass nicht klar ist, was genau quantifiziert werden soll: das **erwartete Ergebnis der Minderung ex ante** oder das tatsächliche Ergebnis der Minderung auf der Grundlage von **Messungen ex post** oder während des Projektbetriebs. Die Vorhersage von Minderungsergebnissen ex-ante ermöglicht die Planung und Anpassung, kann aber zu einer Über- oder Unterschätzung der Auswirkungen des Projekts führen. Andererseits liefert eine ex-post oder auf laufenden Messungen basierende Bilanzierung genauere Daten, kann aber ressourcenintensiv sein und bietet weniger Flexibilität für Anpassungen. Diese Dichotomie fügt einer bereits komplizierten Landschaft eine weitere Komplexitätsebene hinzu und erschwert die Standardisierung der der Bilanzierung z.

Die Frage nach ex-ante und ex-post ist auch eng mit der Frage nach der **"Permanenz"** bzw. der **Anrechnungszeiträume für CO₂-Einspeicherung verbunden**. Das schweizerische Recht verlangt in Art. 5.2 der CO₂-Verordnung für Kohlenstoffentnahmen wie Biochar 30 Jahre vor, aber die IPCC-Methode zur Schätzung der Veränderung der mineralischen organischen Kohlenstoffvorräte im Boden durch Biocharanreicherungen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019, Band 4, Anhang 4) einen Zeitrahmen von 100 Jahren an, da Biochar beständiger ist. Eine Diskussion über die zeitlichen Dimensionen der Kohlenstoffspeicherung kann Auswirkungen auf die Preise für CO₂-Entfernungsgutschriften haben und wird daher innerhalb DeCIRRA weiter analysiert.

5 Referenzen

- Albicker, M., Eichler, M., Flöer, L., Hader, P., & Zwankhuizen, A. (2023). *Carbon Capture & Storage (CCS) – Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050*. Basel: BAK Economics AG und Deutsche Energieagentur. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/externe-studien-berichte/kostenschaetzung-fuer-ein-ccs-system-fuer-die-schweiz-bis-2050.pdf>. Accessed 6 December 2023
- Amiri, A., Ottelin, J., Sorvari, J., & Junnila, S. (2020). Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094076. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba134>
- Antonini, C., Treyer, K., Moiola, E., Bauer, C., Schildhauer, T. J., & Mazzotti, M. (2021). Hydrogen from wood gasification with CCS – a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(10), 2602–2621. <https://doi.org/10.1039/D0SE01637C>
- Antonini, C., Treyer, K., Streb, A., Spek, M. van der, Bauer, C., & Mazzotti, M. (2020). Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(6), 2967–2986. <https://doi.org/10.1039/D0SE00222D>
- Athias, L., Macina, M., & Wicht, P. (2019). Public-Private Partnerships: A Swiss Perspective. In A. Ladner, N. Soguel, Y. Emery, S. Weerts, & S. Nahrath (Eds.), *Swiss Public Administration: Making the State Work Successfully* (pp. 187–204). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92381-9_11
- Bader, P. (2022). Wald und Boden: Mit Bäumen das Klima schützen. *Die Umwelt*, 2/2022, 36–38. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/dossiers/magazin-2022-2-dossier/wald-und-boden-mit-baeumen-das-klima-schuetzen.html>. Accessed 27 October 2023
- Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117, 103635. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>
- Bellamy, R., & Geden, O. (2019). Govern CO₂ removal from the ground up. *Nature Geoscience*, 12(11), 874–876. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0475-7>
- Beuttler, C., Keel, S. G., Leifeld, J., Schmid, M., Berta, N., Gutknecht, V., et al. (2019). *The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy – Fundamentals and Recommended Actions*. Bern: Risk Dialogue Foundation. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=61230&Load=true>. Accessed 21 February 2022
- Brander, M., Ascui, F., Scott, V., & Tett, S. (2021). Carbon accounting for negative emissions technologies. *Climate Policy*, 21(5), 699–717. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1878009>
- Brunner, C., & Knutti, R. (2022). *Potenziäle und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz*. Zurich: ETH Zürich. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--publikationen-und-studien/klima--studien.html>. Accessed 1 November 2023
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2021). *Totalrevision der Verordnung über die Verminderung von Treibhausgasemissionen (CO₂-Verordnung): Erläuternder Bericht* (p. 132). Bern, Switzerland: Bundesamt für Umwelt.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2022). *Jahrbuch Wald und Holz 2022* (No. UZ-2225-D) (p. 108). Bern, Switzerland: Bundesamt für Umwelt. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uz-umwelt-zustand/jahrbuch-wald-und-holz-2022.pdf.download.pdf/UZ-2225-D_JB-WaldHolz%202022.pdf
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), & Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol. (2023). *Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft - Risiken und Chancen für Boden und Klima* (Faktenblatt). Bern, Switzerland: Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/faktenblatt->

- pflanzenkohle-2022.pdf.download.pdf/D_Faktenblatt_Pflanzenkohle.pdf. Accessed 26 October 2023
- Bundesrat. Verordnung vom 30. November 2012 über die Reduktion der CO₂-Emissionen. , Pub. L. No. SR 641.711 (2012). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/de>. Accessed 26 October 2023
- 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, Switzerland: Der Bundesrat, Schweizerische Eidgenossenschaft. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/62745.pdf>. Accessed 25 October 2023
- Bundesrat. (2022). *CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET): Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können. Bericht des Bundesrates*. Bern, Switzerland: Der Bundesrat, Schweizerische Eidgenossenschaft. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/71551.pdf>. Accessed 25 October 2023
- Bundesrat. (2023). *Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 19.3639 Bourgeois vom 18. Juni 2019*. Bern, Switzerland: Der Bundesrat, Schweizerische Eidgenossenschaft. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/76407.pdf>. Accessed 26 October 2023
- Cafaggi, S. (2022, June 16). *Challenges and Opportunities for Biochar and Mass Timber Constructions as NETs in Switzerland* (M.Sc. thesis). ZHAW School of Management and Law, Winterthur.
- Calvin, K., Cowie, A., Berndes, G., Arneth, A., Cherubini, F., Portugal-Pereira, J., et al. (2021). Bioenergy for climate change mitigation: Scale and sustainability. *GCB Bioenergy*, 13(9), 1346–1371. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12863>
- Cames, M., Mader, C., Hermann, A., Köhler, A. R., Malinverno, N., Möller, M., et al. (2023). *Chancen und Risiken von Methoden zur Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre: Empfehlungen aufgrund der Analyse des Wissensstandes und einer systematischen Befragung von Fachleuten in der Schweiz*. (TA-SWISS, Ed.) (1st ed.). Zurich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. <https://doi.org/10.3218/4153-8>
- Cemsuisse. (2021). *Roadmap 2050: Klimaneutraler Zement als Ziel*. Bern: Cemsuisse. https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf. Accessed 30 October 2023
- Chevalier, G., Diamond, L. W., & Leu, W. (2010). Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss Journal of Geosciences*, 103(3), 427–455. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0030-4>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., et al. (2014). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In Intergovernmental Panel On Climate Change, T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, et al. (Eds.), *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (1st ed., pp. 465–570). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Clarke, L., Wei, Y.-M., De La Vega Navarro, A., Garg, A., Hahmann, A. N., Khennas, S., et al. (2023). Energy Systems. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, et al. (Eds.), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1st ed., pp. 613–746). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.008>
- Cleveland, M. (2017). *Carbon Capture and Sequestration* (Policy Paper). Denver, CO: National Conference of State Legislatures. <https://www.wyoleg.gov/Interimcommittee/2017/09-0629appendixg-1.pdf>. Accessed 24 August 2023

- Cobo, S., Galán-Martín, Á., Tulus, V., Huijbregts, M. A. J., & Guillén-Gosálbez, G. (2022). Human and planetary health implications of negative emissions technologies. *Nature Communications*, 13(1), 2535. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30136-7>
- Cobo, S., Negri, V., Valente, A., Reiner, D. M., Hamelin, L., Dowell, N. M., & Guillén-Gosálbez, G. (2023). Sustainable scale-up of negative emissions technologies and practices: where to focus. *Environmental Research Letters*, 18(2), 023001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acacb3>
- Cooper, L., & MacFarlane, D. (2023). Climate-Smart Forestry: Promise and risks for forests, society, and climate. *PLOS Climate*, 2(6), e0000212. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000212>
- Cordier, S., Blanchet, P., Robichaud, F., & Amor, B. (2022). Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material substitutions. *Building and Environment*, 226, 109695. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109695>
- Cowie, A., Pingoud, K., & Schlamadinger, B. (2006). Stock changes or fluxes? Resolving terminological confusion in the debate on land-use change and forestry. *Climate Policy*, 6(2), 161–179. <https://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685593>
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., et al. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- de Kleijne, K., Hanssen, S. V., van Dinteren, L., Huijbregts, M. A. J., van Zelm, R., & de Coninck, H. (2022). Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization. *One Earth*, 5(2), 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.006>
- Deutz, S., & Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nature Energy*, 6(2), 203–213. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>
- Diamond, L. W. (2019). *Deep underground heat reservoirs, Joint NRP70 project “Hydropower and geoenery”* (Technical Report). Bern: University of Bern. <https://nfp-energie.ch/en/projects/960/>. Accessed 2 November 2023
- Dittli, L. (2023, June 15). *Negativemissionstechnologien: Schweizer Akteur Netzwerk und die Einstellung zu Politiken* (M.Sc. thesis). ZHAW School of Management and Law, Winterthur.
- Driesner, T., Gischig, V., Hertrich, M., Loew, S., Maurer, H., Mazzotti, M., et al. (2021). *Swiss Potential for Geothermal Energy and CO₂ Storage: Synthesis Report* (Report). Zurich: ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000518184>
- Eggelston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Accessed 25 October 2023
- Elkerbout, M., & Bryhn, J. (2019). *An enabling framework for carbon capture and storage (CCS) in Europe: A overview of key issues* (CEPS Policy Brief No. 2019/03). Brussels: Centre for European Policy Studies. https://www.ceps.eu/wp-content/uploads/2019/09/RB2019_03_An-enabling-framework-for-carbon-capture-and-storage-in-Europe.pdf. Accessed 1 November 2023
- European Union. Regulation (EU) 2022/869 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2022, on guidelines for trans-European energy infrastructure. , Pub. L. No. 2022/869 (2022). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0869>. Accessed 1 November 2023
- Fajardy, M., & Dowell, N. M. (2017). Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 10(6), 1389–1426. <https://doi.org/10.1039/C7EE00465F>
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Finch, H. (2022). An introduction to the analysis of ranked response data. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 27(7). <https://doi.org/10.7275/TGKH-QK47>
- Frattoni, L., Becattini, V., Krüger, M., Akeret, O., & Mazzotti, M. (2022, August 30). Legal and Regulatory Gaps for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage Deployment. SSRN Scholarly Paper, Rochester, NY. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4285233>

- Frischknecht, R., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Heck, T., Jungbluth, N., et al. (2007). The Environmental Relevance of Capital Goods in Life Cycle Assessments of Products and Services. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 7–17. <https://doi.org/10.1065/lca2007.02.309>
- Frischknecht, R., & Pfäffi, K. (2023). *Bilanzierung von Negativemissionen (NET) im Bauwesen*. Zürich: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Bauen-2000-Watt/Grundlagen-Studienergebnisse/NB/2023/2023-03-nb-Bilanzierung-Negative-Emissionen-Bauwesen.pdf>. Accessed 27 October 2023
- Frischknecht, R., & Ramseier, L. (2020). *Broschüre Ökobilanzen Holz und Holzgebäude*. Uster: treeze Ltd. https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Building_and_Construction/631_Broschuere_Holzrechner.pdf. Accessed 27 October 2023
- Fuhrman, J., Bergero, C., Weber, M., Monteith, S., Wang, F. M., Clarens, A. F., et al. (2023). Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy–water–land system. *Nature Climate Change*, 13(4), 341–350. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01604-9>
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., et al. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Gauch, M., Matasci, C., Hincapié, I., Hörler, R., & Böni, H. (2016). *Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz* (No. 21033) (p. 79). St. Gallen: Empa - Materials Science & Technology. <https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A15590/>. Accessed 27 October 2023
- Gea-Bermúdez, J., Jensen, I. G., Münster, M., Koivisto, M., Kirkerud, J. G., Chen, Y., & Ravn, H. (2021). The role of sector coupling in the green transition: A least-cost energy system development in Northern-central Europe towards 2050. *Applied Energy*, 289, 116685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116685>
- Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.08.007>
- Goglio, P., Williams, A. G., Balta-Ozkan, N., Harris, N. R. P., Williamson, P., Huisingh, D., et al. (2020). Advances and challenges of life cycle assessment (LCA) of greenhouse gas removal technologies to fight climate changes. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118896>
- Grubb, M., Hourcade, J. C., & Neuhoﬀ, K. (2013). *Planetary economics: energy, climate change and the three domains of sustainable development*. New York: Routledge.
- Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Energy and CO₂ analysis of wood substitution in construction. *Climatic Change*, 105(1), 129–153. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9876-8>
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram, C., Després, J., et al. (2021). Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. *Nature Sustainability*, 4(12), 1052–1059. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00772-w>
- Haubold-Rosar, M., Heinkele, T., Rademacher, A., Kern, J., Dicke, C., Funke, A., et al. (2016). *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden* (Texte No. 04/2016) (p. 254). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-risiken-des-einsatzes-von-biokohle-anderer>. Accessed 26 October 2023
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Himes, A., & Busby, G. (2020). Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 4, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100030>
- Hofer, P., Taverna, R., Werner, F., Kaufmann, E., & Thürig, E. (2007). *CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft* (No. UW-0739-D) (p. 102). Bern, Switzerland: Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/co2-effekte-schweizer-wald-holzwirtschaft.html>. Accessed 27 October 2023

- Holzer, K. (2021). The Pending EU CBAM: *Quo Vadis Switzerland?* *Global Trade and Customs Journal*, 16(11/12), 633–643. <https://doi.org/10.54648/GTCJ2021080>
- Honegger, M., Baatz, C., Eberenz, S., Holland-Cunz, A., Michaelowa, A., Pokorny, B., et al. (2022). The ABC of Governance Principles for Carbon Dioxide Removal Policy. *Frontiers in Climate*, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.884163>
- Honegger, M., Poralla, M., Michaelowa, A., & Ahonen, H.-M. (2021). Who Is Paying for Carbon Dioxide Removal? Designing Policy Instruments for Mobilizing Negative Emissions Technologies. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.672996>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, & L. Meyer, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Glossary. In S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Accessed 25 October 2023
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*. (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, & T. Troxler, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/KP_Supplement_Entire_Report.pdf. Accessed 27 October 2023
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. (E. Calvo Buendía, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, et al., Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Accessed 27 October 2023
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Annex I: Glossary. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, et al. (Eds.), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1793–1820). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.020>
- International Energy Agency. (2022). *Direct Air Capture: A key technology for net zero*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://doi.org/10.1787/bbd20707-en>
- Jakob, B. (2022). Die wichtigsten NET-Ansätze. *Die Umwelt*, 2/2022, 13–15. [bafu.admin.ch/magazin2022-2-02](https://www.bafu.admin.ch/magazin2022-2-02). Accessed 27 October 2023
- Kannan, R., & Turton, H. (2014). *Switzerland energy transition scenarios – Development and application of the Swiss TIMES Energy system Model (STEM)* (PSI Bericht No. 14– 06). Villigen: Paul Scherrer Institut (PSI). <https://www.psi.ch/sites/default/files/import/eem/PublicationsTabelle/2014-STEM-PSI-Bericht-14-06.pdf>
- Kayo, C., Kalt, G., Tsunetsugu, Y., Hashimoto, S., Komata, H., Noda, R., & Oka, H. (2021). The default methods in the 2019 Refinement drastically reduce estimates of global carbon sinks of harvested wood products. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00200-8>
- Kemmler, A., Lübbers, S., Ess, F., Thormeyer, C., & Althaus, H.-J. (2021). *Energieperspektiven 2050+: Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS - Potenziale, Kosten und Einsatz* (Energieperspektiven 2050+). Bern, Switzerland: Bundesamt für Energie. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxyYWQvMTA2MjA=.html>. Accessed 30 October 2023
- Kemper, J. (2015). Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 401–430. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.012>
- Kreibich, N., & Hermwille, L. (2016). *Robust Transfers of Mitigation Outcomes - Understanding Environmental Integrity Challenges* (Policy Paper). Wuppertal: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.

- https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6496/file/6496_Robust_Transfers.pdf. Accessed 23 August 2023
- Lädrach, T. (2022). *Jahresbericht 2022 Holzindustrie Schweiz*. Bern: Holzindustrie Schweiz. https://www.holz-bois.ch/fileadmin/his/Dokumente/Jahresbericht/Jahresbericht_2022_Holzindustrie_Schweiz_D.pdf. Accessed 27 October 2023
- Lamster, J. (2023). *Ökologische Kennzahlen für Investoren: Vergleich Holzbau Massivbau*. Zürich: durable Planung und Beratung GmbH. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=70545&Load=true>. Accessed 27 October 2023
- Lin, X., Li, W., Guo, Y., Dong, W., Castel, A., & Wang, K. (2023). Biochar-cement concrete toward decarbonisation and sustainability for construction: Characteristic, performance and perspective. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138219>
- Matthews, H. D. (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>
- McQueen, N., Psarras, Peter. C., Pilorgé, H., Liguori, S., He, J., Yuan, M., et al. (2020). Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the U.S. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7542–7551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00476>
- Mehli, A., Gerner, G., Kulli Honauer, B., Baier, U., Kühni, M., Treichler, A., et al. (2021). *HTC Innovationscampus Rheinmühle - Pilotanlage zur hydrothermalen Karbonisierung: Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse (Schlussbericht)* (Schlussbericht). Bern: Bundesamt für Energie. <https://doi.org/10.21256/zhaw-21929>
- Michaelowa, A., Honegger, M., Poralla, M., Winkler, M., Dalfiume, S., & Nayak, A. (2023). International carbon markets for carbon dioxide removal. *PLOS Climate*, 2(5), e0000118. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000118>
- Moioli, E., & Schildhauer, T. (2022). Negative CO₂ emissions from flexible biofuel synthesis: Concepts, potentials, technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120>
- Müller, D., Eichenberger, M., & Stenz, M. (2015). *Holzbau vs. Massivbau – Ein umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS-Standard*. Rain: PIRMIN JUNG Schweiz AG. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/holzbau_vs_massivbaueinumfangendervergleichzweierbauweisenimzusa.pdf.download.pdf/holzbau_vs_massivbaueinumfangendervergleichzweierbauweisenimzusa.pdf. Accessed 27 October 2023
- Müller, D., & Moser, D. (2022). *Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten*. Rain: PIRMIN JUNG Schweiz AG.
- Nabuurs, G.-J., Mrabet, R., Abu Hatab, A., Bustamante, M., Clark, H., Havlík, P., et al. (2023). Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, et al. (Eds.), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change* (1st ed., pp. 747–860). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>
- Nagel, S. S. (1986). Efficiency, Effectiveness, and Equity in Public Policy Evaluation. *Review of Policy Research*, 6(1), 99–120. <https://doi.org/10.1111/j.1541-1338.1986.tb00651.x>
- Nakhle, C., Eckle, P., & Krüger, M. (2022). *Decarbonizing Cement: Technology assessment and policy relevant evidence for the decarbonization of the Swiss cement industry* (Final report). Zurich: ETH Zurich. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=69298&Load=true>. Accessed 30 October 2023
- Neele, F., Mikunda, T., Seebregts, A., Santen, S., van der Burgt, A., Stiff, S., & Hustad, C. (2013). A Roadmap Towards a European CO₂ Transport Infrastructure. *Energy Procedia*, 37, 7774–7782. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.724>
- Neerup, R., Løge, I. A., Helgason, K., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Svendsen, J. B., et al. (2022). A Call for Standards in the CO₂ Value Chain. *Environmental Science & Technology*, 56(24), 17502–17505. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08119>

- Nick, S., & Thalmann, P. (2021). *Carbon removal, net zero, and implications for Switzerland* (E4S White Paper No. 2021–5). Lausanne: Enterprise for Society Center. https://e4s.center/wp-content/uploads/2022/09/CCUS_WhitePaper-EN.pdf. Accessed 30 October 2023
- Nussbaum, C. (2023). Stand zu den Speicheroptionen in der Schweiz. Presented at the Energieforschungsgespräche Disentis 2023, Disentis: Fachhochschule Graubünden und Alpenforce.
- Panos, E., Kannan, R., Hirschberg, S., & Kober, T. (2022). *Net-zero CO₂ emissions scenarios for Switzerland* (preprint). In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1874405/v1>
- Panos, E., Kannan, R., Hirschberg, S., & Kober, T. (2023). An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00813-6>
- Panos, E., Kober, T., Ramachandran, K., Hirschberg, S., Bauer, C., Schildhauer, T., et al. (2021). *Transformation of the Swiss Energy System for a Net-Zero Greenhouse Gas Emission Society: Results from the Joint Activity Scenarios & Modelling* (Report). Zurich: ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000518179>
- Pape, C., Budaragina, M., Honegger, M., Poralla, M., & Winkler, M. (2023). *Strategy paper: Enabling CCUS value chains for Swiss climate neutrality* (Strategy paper). Zurich: Southpole Carbon and Perspectives Climate Research.
- Petersson, H., Ellison, D., Appiah Mensah, A., Berndes, G., Egnell, G., Lundblad, M., et al. (2022). On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden. *GCB Bioenergy*, 14(7), 793–813. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12943>
- Pittau, F., Habert, G., Savi, D., & Klingler, M. (2022). *Carbon storage project: Technical report: Methodology for biogenic carbon accounting and carbonation in LCA of buildings and construction products* (Report). Zürich: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000554234>
- Poralla, M., Honegger, M., Gameros, C., Wang, Y., Sacherer, A.-K., Ahonen, H.-M., et al. (2022). *Tracking greenhouse gas removals: Baseline and monitoring methodologies, additionality, testing, and accounting*. London and Freiburg i. B.: NET-Rapido Consortium and Perspectives Climate Research. <https://doi.org/10.5167/uzh-230035>
- Pourhashem, G., Hung, S. Y., Medlock, K. B., & Masiello, C. A. (2019). Policy support for biochar: Review and recommendations. *GCB Bioenergy*, 11(2), 364–380. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12582>
- Qiu, Y., Lamers, P., Daioglou, V., McQueen, N., de Boer, H.-S., Harmsen, M., et al. (2022). Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100. *Nature Communications*, 13(1), 3635. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31146-1>
- Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., et al. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Rey, L., & Thalmann, P. (2017). *Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung* (p. 36). Bern: Schweizerischer Nationalfonds. https://www.nfp66.ch/media/de/U9FR1kW1bWK1fNS9/NFP66_Teilsynthese_4_Holzbeschaffung.pdf. Accessed 27 October 2023
- Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J., & Fridahl, M. (2020). *The future of (negative) emissions trading in the European Union* (Working Paper No. No. 2164). Kiel: Kiel Institute for the World Economy.
- Röhrdanz, M., Pannemann, F., Dittrich, K., Klenke, T., Buchwald, R., & Wark, M. (2019). Erweiterung der Verwertungs-Kaskaden von Reststoff-Biomassen durch die Herstellung von HTC-Biokohle am Beispiel unterschiedlicher Güllearten. In J. Marx Gómez, A. Solsbach, T. Klenke, & V. Wohlgemuth (Eds.), *Smart Cities/Smart Regions – Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Innovationen* (pp. 755–763). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25210-6_58
- Rüter, S., Matthews, R. W., Lundblad, M., Sato, A., & Hassan, R. A. (2019). Chapter 12: Harvested Wood Products. In E. Calvo Buendía, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, et al. (Eds.), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse*

- Gas Inventories (Vol. 4). Geneva, Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>. Accessed 27 October 2023
- Rystad, J. (2022). The role of CCS in Europe's decarbonisation. Presented at the Northern Lights Summit 2022, Rystad Energy. <https://norlights.com/news/join-us-at-the-northern-lights-summit-2022/>. Accessed 6 December 2023
- SAIPEM. (2020). *CO₂NET – Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO₂ Sammel-Netzwerk in der Schweiz*. Milano: SAIPEM. <https://www.aramis.admin.ch/Textel/?ProjectID=47346>. Accessed 30 October 2023
- Savi, D., & Klingler, M. (2022). *Kohlenstoffspeicherung im Holzbau: Potenzial des Gebäudeparks in der Schweiz: Schlussbericht* (Report). Zurich: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen. <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Bauen-2000-Watt/Grundlagen-Studienergebnisse/NB/2022/2022-05-nb-Kohlenstoffspeicherung-im-Holzbau-Schlussbericht.pdf>. Accessed 27 October 2023
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Monedero, M. A. S., & Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1708–1730. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcbb.12889>. Accessed 31 May 2023
- Schmidt, T. S., Battke, B., Grosspietsch, D., & Hoffmann, V. H. (2016). Do deployment policies pick technologies by (not) picking applications?—A simulation of investment decisions in technologies with multiple applications. *Research Policy*, 45(10), 1965–1983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.07.001>
- Schneider, L., Duan, M., Stavins, R., Kizzier, K., Broekhoff, D., Jotzo, F., et al. (2019). Double counting and the Paris Agreement rulebook. *Science*, 366(6462), 180–183. <https://doi.org/10.1126/science.aay8750>
- Schweizerische Eidgenossenschaft. Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG). , Pub. L. No. BBI 2022 2403 (2022). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2022/2403/de>. Accessed 25 October 2023
- Selberherr, J., Meier, S., & Kunz, M. (2020). *Holzbaukennzahlen für Investoren*. Zürich: Wüest Partner AG. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/Holzbaukennzahlen_Schlussbericht_200813.pdf.download.pdf/Holzbaukennzahlen_Schlussbericht_200813.pdf. Accessed 27 October 2023
- Selberherr, J., Pöschik, M., & Habegger, R. (2022). *Holzbaukennzahlen für Investoren – Bürobauten*. Zürich: Wüest Partner AG. https://www.lignum.ch/files/images/Downloads_deutsch/Holzbaukennzahlen_Buerobauten_WP_Lignum_BAFU.pdf
- Shayegh, S., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2021). Future Prospects of Direct Air Capture Technologies: Insights From an Expert Elicitation Survey. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.630893>
- Singhal, S. (2023). Biochar as a cost-effective and eco-friendly substitute for binder in concrete: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(2), 984–1009. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2068658>
- Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., Beringer, T., Calvin, K. V., Fuss, S., et al. (2019). Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 255–286. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033129>
- Smith, S., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W., Powis, C., et al. (2023). *State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. Open Science Framework. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>
- Sovacool, B. K., Baum, C. M., Low, S., Roberts, C., & Steinhauser, J. (2022). Climate policy for a net-zero future: ten recommendations for Direct Air Capture. *Environmental Research Letters*, 17(7), 074014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac77a4>
- Strefler, J., Bauer, N., Humpenöder, F., Klein, D., Popp, A., & Kriegler, E. (2021). Carbon dioxide removal technologies are not born equal. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0a11>

- Suter, F. (2016). *To use or not to use: Environmental effects of wood utilization in Switzerland* (Doctoral Thesis). ETH Zürich, Zürich. Retrieved from <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/121744>
- Tanase, L., & Herrera Anchustegui, I. (2023, April 27). EU Hydrogen and the Decarbonized Gas Market Package: Unbundling, Third-Party Access, Tariffs and Discounts Rules at the Core of Transport of Hydrogen. SSRN Scholarly Paper, Rochester, NY. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4431113>
- Tanner, C. (2022, June 16). *Carbon Capture Storage (CCS) and Utilization (CCU) for Switzerland's Path to Net Zero* (M.Sc. thesis). ZHAW School of Management and Law, Winterthur.
- Tanzer, S. E., & Ramírez, A. (2019). When are negative emissions negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 12(4), 1210–1218. <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>
- Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L., & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1701–1721. <https://doi.org/10.1039/D0EE03757E>
- Terlouw, T., Treyer, K., Bauer, C., & Mazzotti, M. (2021). Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 11397–11411. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>
- Teske, S. L., Rüdüsüli, M., Bach, C., & Schildhauer, T. (2019). *Potentialanalyse Power-to-Gas in der Schweiz. Betrachtungen zu Technologien, CO₂, Standorten, Elektrizität, Wirtschaftlichkeit und Einsatz in der Mobilität*. Dübendorf and Villigen: EMPA and PSI. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2649817>
- Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., & Lemm, R. (2017). *Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET* (No. Heft 57, 2017) (p. 299). Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A13277/>. Accessed 31 May 2023
- Think Wood. (2021). *Understanding the Role of Embodied Carbon in Climate Smart Buildings: Report on Carbon Reduction Policy and Design Best Practices*. Think Wood.
- UNFCCC. (2003). *Estimation, Reporting and Accounting of Harvested Wood Products* (Technical Paper No. FCCC/TP/2003/7). Bonn: UNFCCC Secretariat. <http://unfccc.int/resource/docs/tp/tp0307.pdf>. Accessed 25 October 2023
- UNFCCC. (2022). *Concept note: Removal activities under the Article 6.4 Mechanism. Version 01.0* (No. A6.4-SB001-AA-A05). Bonn: UNFCCC Secretariat. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb001-aa-a05.pdf>. Accessed 27 October 2023
- UNFCCC. (2023). *Draft recommendation: Activities involving removals under the Article 6.4 mechanism. Version 03.0* (No. A6.4-SB008-AA-A15). Bonn: UNFCCC Secretariat. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb008-aa-a15.pdf>. Accessed 31 October 2023
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (Ed.). (2018). *European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by inland waterways: (ADN) including the annexed regulations, applicable as from 1 January 2019. Volume 2*. Presented at the Diplomatic Conference for the Adoption of a European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways, New York and Geneva: United Nations. https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/adn/ADN2019/ADN_2019_E_Web.pdf. Accessed 1 November 2023
- van den Broek, M., Mesquita, P., Carneiro, J., Silva, J. R., Berghout, N., Ramírez, A., et al. (2013). Region Specific Challenges of a CO₂ Pipeline Infrastructure in the West Mediterranean Area Model Results Versus Stakeholder Views. *Energy Procedia*, 37, 3137–3146. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.200>
- Verkerk, P. J., Costanza, R., Hetemäki, L., Kubiszewski, I., Leskinen, P., Nabuurs, G. J., et al. (2020). Climate-Smart Forestry: the missing link. *Forest Policy and Economics*, 115, 102164. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>
- Vilarrasa, V. (2016). The role of the stress regime on microseismicity induced by overpressure and cooling in geologic carbon storage. *Geofluids*, 16(5), 941–953. <https://doi.org/10.1111/gfl.12197>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

- Winterberg, N., Weber, R., Laggner, L., & Näher, T. (2022). *Holzendverbrauch Schweiz 2019/20*. Biel: Berner Fachhochschule, Institut für digitale Bau- und Hozwirtschaft IdBH. <https://www.bfh.ch/dam/jcr:07039fa4-a9cd-4e64-b9ab-48423cfeb20a/gesamtbericht-bafu-holzendverbrauch-ch-2019-2020.pdf>. Accessed 27 October 2023
- Withey, P., Johnston, C., & Guo, J. (2019). Quantifying the global warming potential of carbon dioxide emissions from bioenergy with carbon capture and storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109408>
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., et al. (2021). Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>
- Ziaja, J., Wisniowski, R., Jamrozik, A., & Knez, D. (2018). Modern Construction Technologies of Gas Pipelines and Oil Pipelines. Presented at the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2018, Albena, Bulgaria. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.4/S06.080>

6 Anhang

Tabelle 17: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen zur Unterstützung der Entwicklung und Erprobung von CDR-Technologien bis 2030 (angepasst von Dittli, 2023)

Kategorie	Beschreibung Policy-Instrument 2030	N
Gesetzliche Regelungen und Rahmenbedingungen	Klare/stabile Rahmenbedingungen / Regulierungen (ohne weitere Erklärung), um Sicherheit für Privatinvestoren zu bringen	11
	Klare Zielsetzungen für den Umgang mit CO ₂ -Entnahme und -Reduktion. Z.B.: Emissionsgrenzwerte (Stand der Technik / beste verfügbare Technologie) definieren, sanktionierbare Zielvorgaben, etc.	8
	Erleichterte Rahmenbedingungen (z.B.: Genehmigungen für CDR Anlagen vereinfachen, regulatorische Hindernisse abbauen)	7
	Einführung des CO ₂ -Gesetzes / Verankerung im CO ₂ Gesetz	4
	Entwicklung einer ganzheitlichen Strategie für CDR und CCU-Optionen, um zu vermeiden, dass einseitige Fokussierung aus CDR systemrelevante Möglichkeiten zur Energiespeicherung, Stromerzeugung (Biomasse) und Dekarbonisierung verhindert.	4
	Klare Richtlinien/Regulierung von CO ₂ -Entnahmeaktivitäten, sowohl im Inland als auch im Ausland. Das beinhaltet, z.B.: Standards, die festlegen welche Aktivitäten als CO ₂ Entnahme gelten (z.B. Haltbarkeit der CO ₂ Speicherung); Monitoring, Reporting and Verifikation um CO ₂ Leakage zu vermeiden/ zu beobachten; Geldreseven, die bei CO ₂ Leakage einspringen können um das Entwichene CO ₂ wieder zu entnehmen; rechtliche Verantwortlichkeiten und langfristige Haftungsregeln).	4
	Richtlinien für die Beschaffung von Produkten / Public procurement (inkl. Benutzung von CDR Zertifikaten für Kompensation in der Administration)	3
	Regelung der Anrechnung von abgeschiedenem CO ₂ für Unternehmen (z.B. Anerkennung in THG Bilanz und entsprechende Methodiken)	2
	Sektorale Verträge zwischen Behörden und Industrie	1
	Verschärfte Massnahmen und Kompensationspflichten für Sektoren, die ihre Emissionsziele nicht erreichen	1
	Nachrüstungspflicht für grosse Emittenten zur Vermeidung vor Kompensation	1
	Miteinbezug der Grenzkantone bei der Erarbeitung von Transportlösungen.	1
	Wissenschaftlich unabhängige Life-Cycle-Assessments mit der Abschätzung der Risiken.	1
Finanzielle Unterstützung und Anreize	Bereitstellung von Fördergeldern für Forschung, Entwicklung und Demonstrationsprojekte	14
	Finanzierung von Anlagen/Projekten klären/sichern/angehen/unterstützen/vereinfachen (ohne weitere Erklärung wie)	12
	Ausbau von Förderprogrammen und Investitionsbeiträgen für NET-Anlagen	6
	Carbon Contracts for Difference, um Preislücke zu schließen	3

	Festgelegter, kontinuierlich ansteigender CO₂-Preis. Damit werden die Kosten für die Emittenten berechenbar und Investitionen können geplant werden. Wichtig ist, dass es keine Obergrenze gibt. Dann erkennt jeder, dass es umso teurer wird, je länger er wartet. Ausweitung des Schweizer Technologiefonds zu einem Schweizer Carbon Removal Fonds Schaffung von Anreizen für den Einsatz von CO₂-Entnahme-Technologien durch eine markante Erhöhung des Preises für Klik-Zertifikate Defizitgarantien für first movers Garantien setzen für die Grossinvestitionen insb. für gemeinsame Infrastruktur-Bedarfe, die sonst nicht getätigt werden. Vergünstigte Elektrizitätspreise für Verflüssigung von CO₂ Anschubfinanzierung für CO₂ Logistikkette (z.B. Bahnverladeanlagen) Förderung der Industrien mit sehr hohem Potential (beste Skaleneffekten, z.Bsp. Zement, KVA's) zu CCS / CCU / NET bevorzugen. Direct Air Capture oder CO₂ in Beton zu speichern ist deutlich ineffizienter. CCS soll auch durch den Verursacher bezahlt werden. Zurückhaltende Subventionierung, nur in Zusammenhang mit Startfinanzierung/Forschung/Pilotprojekten. Mittel- und langfristig müssen sich Innovationen selbst tragen (Subventionen machen abhängig) —> darum: wirtschaftliche Investitionen nicht subventionieren (falsche Anreize) Weitere Anreize (Steuerliche Anreize, Unterstützende Lenkungsmaßnahmen, Unterstützung von freiwilligen Aktivitäten im Bereich CDR)	3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
Schaffung von Infrastruktur und Netzwerken	Ausbau von CO₂-Transportinfrastrukturen Schaffung einer Organisation aus Behörden und Privatunternehmen zur Koordination und Umsetzung von CO₂-Entnahme-Massnahmen Einrichtung von CCS/CCU/CDR-Hubs und Clustern Massiver Ausbau an erneuerbaren Energien und Projekte, welche die Infrastruktur für deren Verteilung garantieren. Erarbeitung von Business Modellen für alle verschiedenen Emittentengruppen	3 3 1 1 1
Internationale Zusammenarbeit und Verträge	Abschluss von internationalen Verträgen zur Regelung des Transports und der Speicherung von abgefangenem CO₂ Klärung und Beseitigung regulatorischer Hemmnisse für den internationalen Transport und Handel mit CO₂-Entnahme (Zoll, Deklaration Abfall/Chemical) Artikel 6-Pilotprojekte Schweizer CDR Technologieanbieter im Ausland	4 2 1
Kommunikation und Bewusstseinsbildung	Informationskampagnen, um die Bedeutung von CO₂-Entnahme-Massnahmen der breiten Bevölkerung näherzubringen Förderung von Fachverbänden und Wissensplattformen zur Schaffung von Austausch und Zusammenarbeit	2 2

	Transparenz über die Deklaration von CO ₂ bei Produkten. Mit klaren Berechnungs und Deklarationsmethoden (z.B. CO ₂ -freie vs CO ₂ -reduzierte vs CO ₂ -emittierende Produkte).	1
	Lichtturmprojekte und Startups im öffentlichen Diskurs präsentieren, um Investoren zu finden.	1
Spezifisch zu CO ₂ -Märkte	Robuster Markt für den Handel mit NET-Zertifikaten aufbauen (inkl. z.B., Koordination mit EU, langfristige Abnahme von NET-Zertifikaten, verpflichtende Abnahme von NET-Zertifikaten, Anrechenbarkeit im EHS).	5
	Preiskorridore	1
	Klare Richtlinien für CDR-Zertifikate	1
	Im Rahmen des ETS ist CBAM nötig.	1
Spezifisch zu Biochar	Grundbucheintrag beim Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft wieder aufheben	2
	Herunterfahren von Subventionen und Klimaschutzgutschriften für die komplette Verbrennung von Biomasse (und damit Vernichtung der möglichen Senkenleistung)	1
	Klassifizierung von Biochar aus unterschiedlichen Substraten und deren Zulassung für die Einbringung in den Boden (Zertifizierung).	1
	Wissenschaftlicher, fundierter Umgang mit Pflanzenkohle in der Gesetzgebung und den Vorschriften zur Anwendung von PK in der Landwirtschaft (Ängste der Bodenschützer abbauen, Verständnis über die Wirkung und Eigenschaften der Pflanzenkohle bei zuständigen Stellen fördern)	1
	Marktmechanismen fördern indem das CO ₂ in allen Prozessen eingepreist wird, insbesondere in der Verwertung von Biomasse.	1
Spezifisch zu TCCS	Förderung / Abgeltung für Bauherren, welche mit Holz bauen	2
	Grenzwerte Finanzmarktregulierung für grüne Immobilienportfolios auf Grundlage Ökobilanzierung (Alle Indikatoren aus der KBOB Liste Ökobilanzdaten im Baubereich) von Gebäude Lebenszyklusphasen Nutzung, Herstellung und Entsorgung.	1
	Der Bund verlangt in einem Gesetz den Nachweis der Umweltauswirkungen bei allen Baueingaben auf Grundlage KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich.	1
	Der Bund unterstützt die Entwicklung der digitalen Baueingabe auf Basis IFC Austauschformat.	1
	Anpassung von Normen und Gebäudelabels	1
Spezifisch für KVA Anlagen	Gebühr/Steuer für Müll, die CCS bei KVAs finanziert	1
	Fokus auf Umrüstung der KVA mit carbon-capture-System	1
	Einbinden in das / Finanzierung über das Abfallgesetz oder andere existierende Gesetze.	1
	Stofflich/Thermische Abfallverwertung (Zementwerke) müssen vor der nur Thermischen Abfallverwertung stehen.	1
Spezifisch für Agrarsektor	Maßnahmebezogene Förderung von landwirtschaftlichen Massnahmen, v.a. Agroforst	1

Tabelle 18: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen zur Unterstützung der breiten Einführung von CDR-Technologien bis 2050 (angepasst von Dittli, 2023)

Kategorie	Beschreibung Policy-Instrument 2050	N
Planung und Organisation	Schaffung klarer/ausreichender Regulatoren / Rahmenbedingungen	5
	Unterstützung/Akzeptanz der Bevölkerung erreichen (u.a. durch Informationskampagnen)	5
	Kontinuierliche Arbeit und Zusammenarbeit zwischen Behörden und Privatunternehmen	3
	Offenheit der Behörden, Mut, Neues auszuprobieren, Bereitschaft, Fehler zu machen, Entscheidungsfreudigkeit	2
	Korrekte Abbildung der Synergien zwischen CDR, CCU/PtG (inkl. Produktion von grünem H ₂) in den Regularien/Gesetzen/Marktregeln.	2
	Betrachtung der gesamten Nutzungskaskade	1
	Aufrechterhaltung des Drucks seitens NGOs, Politik und Gesellschaft	1
	Plan, wie CCUS mit anderen Massnahmen (z.B. Suffizienz) vereinbar ist.	1
	Berücksichtigung von CDR in nationalen Treibhausgasinventaren	1
	Die Politik muss langfristige Rahmenbedingungen setzen und die Umsetzung der Massnahmen der Wirtschaft überlassen. Sie soll lediglich moderat mit Förderung und Lenkung eingreifen.	1
	Wertewandel von einseitiger Geldorientierung (kurzfristig maximaler Gewinn für Wenige mit grossem Ressourcenverschleiss) zu umfassender nachhaltiger langfristiger und integraler Nutzenorientierung für Alle (mit weniger Ressourcen mehr Nutzen erzeugen).	1
	Raumplanerische Massnahmen begleitend von aufklärenden, sensibilisierenden Massnahmen, damit das Potenzial von CDR-Methoden maximiert wird.	1
	Vereinfachten Zugriff zu Kapitalgeber, Fördergelder & Investoren	1
	Zuerst müssen die Rahmenbedingungen erfüllt sein. Subventionen sind heute nutzlos, da die Grundlagen der Gesetzgebung vor allem bei der Entsorgung (USG, VVEA) nicht gegeben sind.	1
	Klare Definition von CDR. Einbettung von CDR in CH Klimapolitik. Vorbereitung hin zu einem vollumfänglichen Politikinstrumentarium für CDR mit dem Kern einer Art öffentlicher CO ₂ -Entsorgungswirtschaft (Vergleich mit heutiger Kerraichtabfuhr).	1
Regulatorische Massnahmen	Einführung von verbindlichen CDR-Zielen/Zielpfaden, mit Sanktionen, eventuell sektoriell, über 2030 hinaus	10
	Einführung von Emissionsausgleichssystemen (od. Rücknahmeverpflichtungen), bei denen (ein Teil der) Restemissionen der Unternehmen durch technische CDR-Zertifikate kompensiert wird	5
	Einführung von verbindlichen Emissionsreduktions-Zielen/Zielpfaden (bis zum Netto-Null Ziel)	5

	Einführung der öffentlichen Beschaffung von qualitativ hochwertigem CDR, finanziert durch neue Einnahmequellen	1
	Einführung von Verboten	1
	Weitere Lesung des CO ₂ -Gesetzes mit sich verschärfenden Massnahmen	1
	Konsequente Anwendung von Ökobilanz-Nachweisen im Bausektor, Industriesektor und Finanzsektor.	1
	Weg von der Verbrennung.	1
	Lachgasemissionen sanktionieren oder vermiedene Emissionen belohnen.	1
	Gesetzliche Regelungen, die den Einsatz von CCS in grossen Punktquellen (Zement, Stahl, sonst. Industrie) wirtschaftlich möglich macht: z.B. degressive CO ₂ -Grenzwerte für Baumaterialien inkl. Grenzschutz für CH-Produzenten.	1
Finanzielle Unterstützung und Anreize	Angemessener / kontinuierlich ansteigender CO ₂ Preis	5
	Finanzfragen müssen schon geklärt sein.	3
	Verursacherprinzip bei der Finanzierung. (Keine Bundesgelder für die CO ₂ -Abscheidung und Speicherung. Die Kosten müssen durch die Emittenten getragen werden. Die Produkte wie z.B. Stahl oder Zement verteuern sich und werden weniger konkurrenzfähig gegenüber sinnvollerem Materialien wie z.B. Holz als Baustoff.)	3
	Einführung von Einnahmegarantien (oder garantierten Preisen für negative/vermiedene Emissionen), um Projekten Sicherheit zu geben	3
	Einführung von Steuergutschriften, die sich auf das investierte Kapital oder den Gewinn pro Tonne CO ₂ beziehen	2
	Einführung von Subventionen zur Stimulierung des Sektors (wie SDE++ in den Niederlanden)	2
	Internalisierung externer Kosten	2
	Gesetzliche Verankerung einer Gebühr/Steuer für Müll, die die vollen Kosten für BiCRS in jeder Abfallverbrennungsanlage abdeckt	1
	Sinnvolle Finanzierung. Konkret bei unseren KVA: Nicht über eine zusätzliche Müllgebühr, sonst verdreifachen sich die Behandlungskosten. Dann findet der Müll neue Wege	1
	Verankerung ähnlicher Mechanismen für Biogas- und Biomasseanlagen sowie Zementwerke im Gesetz	1
	Entwicklung eines Förderprogramms mit umgekehrter Auktion (wie in Schweden)	1
	Einrichtung eines Instruments zur Finanzierung von Grossanlagen wie dem Europäischen Innovationsfonds oder dem dänischen CCS-Projektfonds	1
	Hohe und gesicherte Förderbeiträge zur direkten Unterstützung der Privatwirtschaft zur Kommerzialisierung von CDR-Technologien.	1
	Strukturelle Integration des CO ₂ Preises in den Handel (das allerdings wird nur zumindest europaweit möglich sein, nicht nur in der CH)	1

Internationale Zusammenarbeit	Stärkung der internationalen Kooperation (insb. mit der EU) und Kapazitätsaufbau	5
	Prüfung des rechtlichen Rahmens (EU CCS Directive, London Convention/Protocol für den grenzüberschreitenden Transport)	1
	Da die Schweiz CO ₂ nicht lagern kann, braucht es immer noch gute Transportunterstützungen	1
	Internationale Verträge zum Transport und zur Speicherung des abgefangenen CO ₂ .	1
	Vermeiden, dass CO ₂ Emissionen importiert werden, d.h. Besteuerung CO ₂ Emissionen auf importierte Produkte.	1
	Verbindliche internationale Vereinbarungen zu Klimazielen	1
Infrastruktur	Aufbau CO ₂ -Infrastruktur (Transport und/oder Speicherung).	10
	Die Energieversorgung (aus Erneuerbaren) muss sichergestellt sein.	3
	Zur Verfügungstellung von geeigneten Arealen für CO ₂ Bahnverladeanlagen	1
Spezifisch zu CO ₂ -Märkte	Sukzessive Integration von CDR in compliance markets, inklusive das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) und das Schweizer ETS	3
	Kein Zertifikatehandel mehr, denn dies dient ja nur für die Kompensation und nicht für eine Reduktion der Emissionen	1
Spezifisch zu TCCS	MUKEN legen nicht nur Grenzwerte zu Umweltauswirkungen in der Lebenszyklusphase Nutzung, sondern auch in Herstellung und Entsorgung fest. (Primärenergie (inkl. allen Unterteilungen oder Treibhausgase)	1
	Der Bund führt in der Beschaffung als Vorbild die digitale Baueingabe auf Basis IFC - Austauschformat ein, inkl. Nachweis Umweltauswirkungen.	1
	Unterscheidung zwischen biogenem und fossilem CO ₂ -Ausstoss ist aufzuheben. Dies dient nur dazu, CO ₂ -Emissionen "schönzurechnen", wie z.B. Herstellung von Zement mit alternativen Brennstoffen.	1
	Langfristig ist vollständig auf Stahlbeton am Bau zu verzichten.	1
Spezifisch zu Forst- und Agrarsektor	Die regenerative Landwirtschaft zusammen mit BECCS und Biochar (zusammen ein Massnahmen-Komplex) können alleine schon 2/3 der Aufgabe stemmen weltweit - in der Schweiz etwas weniger, weil wir unterproportional Nahrung selber erzeugen. Kein Dünger- und Futtermittelimport mehr bis dahin. Produktion aber trotzdem steigern - das geht. Wir können sogar Vollversorgung erreichen* Permakultur etc.. Steingärten verbieten. Möglichst dreidimensionale, ganzjährige Begrünungen.	1
	Senkenleistung in der Land- und Forstwirtschaft erhöhen durch CO ₂ Marktanreize aber auch durch Verbote gewisser schädlicher Praktiken wie die intensive Bewirtschaftung von organischen Böden.	1
	Positive Nebeneffekte von natürlichen CDR Massnahmen müssen zusätzlich zum CO ₂ Speichernutzen monetarisiert werden (Emissionsreduktionen durch Pflanzenkohle im Feld, Biodiversitätsleistung von Agroforstsystemen etc.)	1
	Wald- Wild Problematik endlich lösen. Mit der Klimaerwärmung hat der Wald schon genug Probleme. Wenn sich die Wildproblematik nicht drastisch ändert, hat die Waldverjüngung keine Chance.	1

Weitere Aspekte	Finanzierung der Forschung und Entwicklung (z.B. aus der CO ₂ -Abgabe). Spezifisch genannte Forschungsbereiche: Utilization, Speicherlösungen, technische CDR Lösungen, Verwendung von Pflanzenkohle.	5
	Komplexe CDR-Technologien mit Mehrfach-Umweltnutzen wie Pflanzenkohle, Holznutzung, Biologische Methoden und Humusaufbau sind durch die Politik zu priorisieren. Diese Technologien sind komplexer, bringen aber gesamtheitlich neben dem CDR weit mehr für die Gesellschaft.	1
	Förderung der Industrien mit sehr hohem Potential (beste Skaleneffekten, z.Bsp. Zement, KVA's) zu CCS / CCU / NET bevorzugen. Direct Air Capture oder CO ₂ in Beton zu speichern ist deutlich ineffizienter.	1
	Es sollten alle Möglichkeit der CO ₂ Abscheidung, unabhängig von der Konzentration des CO ₂ , sofern es sich um eine indirekte Abscheidung handelt, gezielt unterstützen.	1
	Die konsequente Verknüpfung mit einer Kreislaufwirtschaft, mit besonderem Blick auf die Nutzung von Biochar im Kreislauf, statt Erdölprodukte	1
	Anpassung des Waldes an den Klimawandel	1

Tabelle 19: Von den Interessengruppen vorgeschlagene politische Maßnahmen für die Entwicklung von Transport und Speicher Kapazitäten (angepasst von Dittli, 2023)

Kategorie	Genannte Transport- oder Speicherung-relevante Massnahmen	N
Rechtliche und organisatorische Voraussetzungen	Klärung/Vereinfachung/Harmonisierung der rechtlichen Anforderungen für den internationalen/cross-border Transport von CO ₂ (Klassifizierung als Abfall, Gefahrgut oder Produkt; EU CCS Directive; London Convention/Protocol for cross-border transport)	16
	Suche/Kartografieren von möglichen Speicherstätten in der Schweiz	9
	Unterzeichnung bilateraler Abkommen mit Ländern mit geologischem Speicherpotenzial (Norwegen, Dänemark, Niederlande); Besprechung konkreter Liefer- und Abnahmemengen	8
	Rechtsgrundlage für die Entwicklung einer Pipeline schaffen / Eine CO ₂ Pipeline muss auf Bundesebene koordiniert werden. Verwaltung des Untergrunds ist offensichtlich Sache der Kantone.	4
	Rechtlicher Rahmen für Liability für den Fall von Leakage / Seepage (inkl. Versicherungsmodi + private-public partnerships um Risiken zu reduzieren)	2
	Start der Planung / Entwicklung eines Business Plans für die Pipeline (Arbeit könnte z.B. von der Regierung in Auftrag gegeben und von einer öffentlichen oder privaten Forschungseinrichtung durchgeführt werden).	2
	Planungstechnische Schritte zur inländischen Speicherung (Untergrund und Produkte) unternehmen (inkl. öffentlicher Debatte).	2
	Stimulierung der Bündelung von Mengen durch nationale oder regionale Planung und die Förderung von Clustern	1
	Entwicklung einer Kartierung der Emittenten von Punktquellen und potenziellen Clustern und Ermöglichung der Zusammenarbeit innerhalb solcher Cluster	1
	Erstellung eines nationalen Registers für Emittenten von Punktquellen, die am Transport von CO ₂ interessiert sind	1

	CO ₂ muss im Inland gespeichert werden. Export ist keine Option.	1
	Fokus auf internationale Kooperation statt inländischer Speicherung.	1
	Die Speicherung und der Transport von CO ₂ ist immer noch ein linearer Prozess. Besser wäre ein Kreislauf wie beim Holz. Wenn die Zementindustrie die Speicherung, Transport und Lagerung selber bezahlen muss, wird sie langsam verschwinden und damit auch die Erfordernis zur Speicherung und zum Transport von CO ₂ .	1
	Die Speicherung zulassen	1
	EU-Rahmenabkommen mit entsprechenden Ergänzungen	1
	Es braucht einen klaren Rahmen und eine Strategie des Bundes, um ein geplantes Hochfahren der Transportlogistik - Tanks/Zug/Schiff - Pipeline - durch privatwirtschaftliche, resp. parastaatliche Akteure zu ermöglichen.	1
	Risiken und Konflikte müssen von einer unabhängigen Instanz analysiert werden.	1
	Speicherung: Das BWL und BAFU darf aus meiner Sicht offener werden im Bereich Einsatz von EBC-AgroBio Pflanzenkohle (hochwertige Pflanzenkohle) in landwirtschaftlichen Böden.	1
	Transport und Lagerung muss auditert und zertifiziert werden. Dazu benötigt es ein Qualitätssicherungssystem und klare politische Vorgaben	1
	CO ₂ Transport Vorschriften aufheben	1
	Die Infrastruktur muss allen Nutzern zu gleichen Konditionen bereitgestellt werden	1
Finanzielle Unterstützung und Anreize	Bereitstellung öffentlicher Infrastruktursubventionen.	3
	Schlüsseltechnologie HTC für die biologische Speicherung fördern.	1
	Garantien setzen (Einnahmegarantien oder anderen Mechanismen zur Risikominderung) für die Grossinvestitionen insb. für gemeinsame Transport Infrastruktur-Bedarfe, die sonst nicht getätigt werden.	1
Forschung	Einleitung von Forschungsarbeiten zu neuen CO ₂ -Transportoptionen im Inland (z. B. Iso-Tanks auf der Schiene)	1
	Untersuchung der Durchführbarkeit von CO ₂ -Railtanks, die heute kurze CO ₂ -Haltezeiten haben und für lange Fahrten zu den Lagerstätten noch ungeeignet sind	1
	Untersuchung weiterer Transportalternativen, die grösser als ISO-Container und für die Anforderungen des CO ₂ -Transports geeignet sind	1
	Ermöglichung eines ersten Pilotprojekts für die lokale CO ₂ -Speicherung vor 2030, um die Kapazitäten und das Fachwissen der Schweiz zu diesem Thema aufzubauen und weitere Möglichkeiten in diesem Sektor zu fördern.	1
Planung von Infrastrukturen	(Öffentliche) Bereitstellung der CO ₂ -Transport-Infrastruktur innerhalb der Schweiz, ähnlich wie das Strassennetz	6
	Planung von Infrastrukturen von gemeinsamem Interesse, wie z.B. Zwischenlager in Basel	1
	Identifizierung der wichtigsten Infrastrukturen von gemeinsamem Interesse, die die Kosten senken und/oder den Transport von CO ₂ ermöglichen.	1

	Sicherung von Platz / Umschlagsanlagen an Bahnhöfen (Pipeline zum Bhf) resp. Erstellung von Anschlussgleisen zum Emittenten (wo möglich). Koordination der Umschlagsstellen Schiene --> Pipeline	1
	Koordinierte CO ₂ -Anbindung im Ausland	1
Öffentlichkeitsarbeit	Es braucht politische und gesellschaftliche Akzeptanz. Ein Schwerpunkt sollte hier auf Kommunikation und Meinungsbildung liegen.	3
	Frühzeitiges Stakeholderengagement in Gemeinden, in denen CO ₂ Speicherung durchgeführt wird	1