

Kanton Zürich und Stadt Zürich

Negative Emissionen und Treibhausgas-Zertifikatehandel Potenziale, Kosten und mögliche Handlungsoptionen

Grundlagen zur Erarbeitung der langfristigen Klimastrategie des Kantons Zürich und
der Netto-Null-Szenarien für die Stadt Zürich
Zürich, 2. Juni 2020

Teil 1 (Senken): Matthias Honegger, Matthias Poralla, Axel Michaelowa (Perspectives)
Teil 2 (Zertifikatehandel): Jürg Füssler, Stefan Kessler (INFRAS)



Impressum

Negative Emissionen und Treibhausgas-Zertifikatehandel

Potenziale, Kosten und mögliche Handlungsoptionen

Grundlagen zur Erarbeitung der langfristigen Klimastrategie des Kantons Zürich und der Netto-Null-Szenarien für die Stadt Zürich

Zürich, 2. Juni 2020

1805_Bericht NETS und Zertifikate_Master revidiert v3.1_cl

Auftraggeber

Kanton Zürich und Stadt Zürich

Projektleitung

Jürg Füssler und Matthias Honegger

Autoren

Teil 1: Matthias Honegger, Matthias Poralla, Axel Michaelowa (Perspectives)

Teil 2: Jürg Füssler, Stefan Kessler (INFRAS)

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Perspectives Climate Group GmbH

Tel. +49 761 590 33 823

info@perspectives.cc

Begleitgruppe

Kanton Zürich: Floris Heim (AWEL), Nathalie Hutter (AWEL)

Stadt Zürich: Jonas Fricker (UGZ), Silvia Banfi Frost (DIB/EB), Rahel Gessler (UGZ),

Levin Koller (DIB/EB), Rainer Zah (UGZ)

Das Autorenteam dankt den Mitgliedern der Begleitgruppe für die fruchtbaren Hinweise und Rückmeldungen auf frühere Versionen des Berichtes sowie den befragten Expertinnen und Experten (siehe Tabelle A3 im Anhang zu Teil 1). Der Bericht widerspiegelt ausschliesslich die Sicht der Autoren und nicht diejenige der Begleitgruppe oder der Auftraggeber.

Bildlegende: Holzkonstruktion des TA-Media-Gebäudes in Zürich (Keystone/ Christian Beutler)

Inhalt

Impressum	2
Inhalt	3
Glossar	6
Zusammenfassung	7
Einleitung	13
Teil 1: Rolle von Negativen Emissionen	15
1.1. Sechs Kategorien von NETs	15
1.2. Wissensgrundlage und Vorgehen	16
2. Wald und Holz	18
2.1. Wissensstand	18
2.2. Ist-Zustand für den Kanton Zürich	19
2.3. Ist-Zustand für die Stadt Zürich	19
2.4. Kosten und Potenziale	19
2.5. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	22
3. Erhalten bestehender Moore und Wiedervernässung früherer Moorflächen	23
3.1. Wissensstand	23
3.2. Ist-Zustand für den Kanton Zürich	24
3.3. Kosten und Potenziale	26
3.4. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	27
4. Landwirtschaftliche Böden	28
4.1. Wissensstand	28
4.2. Ist-Zustand für die Stadt Zürich	30
4.3. Ist-Zustand für den Kanton Zürich	30
4.4. Kosten und Potenziale	31
4.5. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	34

5.	Beschleunigte Verwitterung	36
5.1.	Wissensstand	36
5.2.	Ist-Zustand für den Kanton und Stadt Zürich	38
5.3.	Kosten und Potenziale	38
5.4.	Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	39
6.	Biomasse und CCS (KVA-CCS und BECCS)	40
6.1.	Wissensstand	41
6.2.	Ist-Zustand im Kanton Zürich	42
6.3.	Ist-Zustand für die Stadt Zürich	43
6.4.	Kosten und Potenziale	44
6.5.	Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	46
7.	Direct Air Capture and Storage (DACCS)	47
7.1.	Wissensstand	48
7.2.	Ist-Zustand für den Kanton und die Stadt Zürich	48
7.3.	Kosten und Potenziale	49
7.4.	Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich	50
8.	Zusammenfassung der NETs-Potenziale und Kosten	51
9.	Fazit und Ausblick zu NETs	55
Anhang Teil 1		57
Teil 2: Rolle des Handels mit Treibhausgas-Zertifikaten		60
10.	Einleitung	60
11.	Rolle des internationalen Zertifikatehandels	60
11.1.	Stand der Dinge heute, Engagement des Bundes in Artikel-6-Mechanismen	60
11.2.	Potenzial und Kosten des internationalen Zertifikatehandels	67
11.3.	Zwischenfazit zur Rolle des internationalen Zertifikatshandels	74
12.	Internationaler Handel von Zertifikaten aus Negativemissionstechnologien	78
13.	Rolle des Handels von nationalen Bescheinigungen	79

13.1.	Bescheinigungen aus Kompensationsprojekten in Inland _____	79
13.2.	Erfahrungen_____	80
13.3.	Mögliche Anwendungen für den Kanton Zürich und Stadt Zürich _____	81
14.	Fazit und Ausblick zur Rolle von Zertifikatemärkten_____	82
Literatur	_____	84

Glossar

Tabelle 1: Abkürzungen und Akronyme

ALN	Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
BECCS	Biomasse basierte Energieproduktion (Strom und/oder Wärme) mit CCS (Englisch: Bio-energy with Carbon Capture and Storage)
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid, das dominierende Treibhausgas (s. THG)
CO ₂ e	Kohlendioxidäquivalent
CCS	Kohlenstoffabscheidung und Speicherung (Englisch: Carbon Capture and Storage)
CDM	Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Englisch: Clean Development Mechanism)
CHF	Schweizer Franken
CPLC	Carbon Pricing Leadership Coalition
DACCS	Direktes CO ₂ Einfangen aus der Luft und Speichern (Englisch: Direct Air Carbon Capture and Storage)
Gt	Gigatonne
GWh	Gigawattstunde
ha	Hektar
IETA	International Emissions Trading Association
IPCC	Weltklimarat (Englisch: Intergovernmental Panel on Climate Change)
IRR	Interner Zinssatz (Englisch: Internal Rate of Return)
KLIK	Stiftung Klimaschutz und CO ₂ -Kompensation
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
kWh	Kilowattstunde
NDC	Klimaziele der Staaten (Englisch: Nationally Determined Contribution)
NET	Negativ-Emissions-Technologie
NSGK	Naturschutz-Gesamtkonzept
OS	Organische Substanz (in Böden)
THG	Treibhausgas

Zusammenfassung

Die Nutzung von Negativemissionstechnologien

Das Entfernen von CO₂ aus der Atmosphäre soll nicht nur zur beschleunigten Absenkung der Emissionspfade von Treibhausgasen dienen, sondern insbesondere auch die langfristig verbleibenden und nicht weiter verminderbaren Restemissionen durch «negative Emissionen» ausgleichen, um das Netto-Null-Ziel erreichen zu können. Obschon in der Stadt bzw. im Kanton Zürich heute noch keine Negativemissionstechnologien eingesetzt werden, könnten – sofern frühzeitig entsprechende Massnahmen geplant und umgesetzt werden – langfristig CO₂ nur in der Grössenordnung von bis zu 0.5 tCO₂ pro Einwohner entfernt werden. Damit wird deutlich, dass mit Negativemissionstechnologien das Netto-Null-Ziel nur erreicht werden kann, wenn vorgängig die Emissionen durch massive Minderungsaktivitäten auf wenige Restemissionen reduziert werden können. Massnahmen mit Negativemissionstechnologien betreffen verschiedene Sektoren und Akteure: insbesondere die Strom- und Wärmeproduktion, die Forstwirtschaft und Holznutzung, die Landwirtschaft und der Moorschutz, sowie neue industrielle Prozesse wie das direkte «Einfangen» von CO₂, sowie die geologische Speicherung von CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage) im In- oder Ausland.

Das grösste Potenzial im Kanton bzw. der Stadt Zürich bietet wohl die technische Abscheidung und geologische Speicherung im Rahmen der Abfallverwertung (ca. die Hälfte des gesamten Potentials) sowie der Biomasse-Energieproduktion (für Strom und Fernwärme; ca. 25%). Schätzungen der Kosten dieser Ansätze sind vergleichbar mit inländischen langfristigen Emissionsminderungsmaßnahmen (in der Grössenordnung von 175CHF je Tonne CO₂ – wobei noch sehr grosse Unsicherheiten bestehen). Voraussetzung ist jedoch, dass CO₂ in grossen Mengen kostengünstig zu ausländischen Speicherstätten transportiert werden kann, oder dass geologische Speicherstätten in der Schweiz zügig geplant und in Betrieb genommen werden. Diese offenen Punkte könnten diese Technologien noch wesentlich verteuern. Die geologische Speicherung von CO₂ in der Schweiz – obschon technisch wohl möglich – könnte in Anbetracht gewisser Risiken und der dichten Besiedelung auf starke Widerstände stossen. Zudem stellt sich die Frage, wie gross die soziale Akzeptanz wäre, dass grosse Mengen an CO₂ ins Ausland transportiert und in ausländischen Speicherprojekten gelagert würden und wie weit solche überhaupt langfristig zur Verfügung stehen. Das direkte Einfangen von CO₂ aus der Luft könnte ebenfalls CO₂ für die geologische Speicherung bereitstellen, wäre jedoch noch kostspieliger und mit einem höheren Energieaufwand verbunden.

Massnahmen in der Landwirtschaft, welche den Kohlenstoffgehalt der Böden durch Humusaufbau oder Einbringen von Pflanzenkohle steigern, könnten ebenfalls zur CO₂-Entfernung

beitragen. Die Nutzung von zertifizierter Pflanzenkohle – obschon teilweise kontrovers betrachtet – scheint schon heute günstig (gemäss Schätzungen für Kosten in Grössenordnungen von 10-30CHF/tCO₂) machbar und könnte langfristig einen substantiellen Beitrag leisten (bis ca. 20% der CO₂-Entfernungspotentiale). Bei diesem wie auch anderen Ansätzen (wie z.B. veränderter Bewirtschaftungsmethoden) besteht noch weiterer Forschungsbedarf zu deren Effektivität, Nebeneffekten und derer Wirtschaftlichkeit.

Auch die Nutzung von Holz als Baustoff könnte möglicherweise mit geringen oder gar ohne zusätzliche Kosten CO₂-binden und – sofern dieses bei der Entsorgung geologisch gespeichert wird – zu einer Entfernung führen (in der Grössenordnung von 5% des gesamten Potentials).

Neuartige Ansätze wie die beschleunigte Verwitterung durch das Ausbringen fein gemahlener Silikatgesteine auf Landwirtschaftsböden könnten möglicherweise auch CO₂-binden (bis knapp 5% des gesamten Potentials) und positive wie auch negative Nebenwirkungen haben. Diese sind aber bezüglich Kosten, Nutzen und Nebenwirkungen noch zu wenig erforscht und aufgrund der Unsicherheiten ist die grundsätzliche Zulässigkeit zu prüfen.

Moorschutz und Renaturierung ehemaliger Moorflächen könnte langfristig einen bescheidenen Senkenbeitrag leisten, dieser ist mit sehr langen Zeiträumen und grossen Unsicherheiten behaftet (jedoch können dabei substanziale Emissionen vermieden werden).

Aufgrund geringen praktischen Erfahrungen mit den meisten der betrachteten Ansätze zur CO₂-Entfernung sind die Machbarkeit in Zusammenarbeit mit verschiedenen – je nach Ansatz unterschiedlichen – Akteuren mit entsprechendem Praxiswissen zu prüfen (z.B. CO₂-Abscheidung bei Kehrrechtverwertungsanlagen oder Biomassekraftwerken und die Machbarkeit von CO₂-Transporten und die geologische Speicherung) und systematisch in Pilotprojekten zu erkunden (z.B. wissenschaftlich begleiteter Einsatz von Pflanzenkohle). Ziel muss sein, die zu erwartenden direkten und gesamtwirtschaftlichen Kosten abschätzen zu können und das Potenzial für Synergien (z.B. Pflanzenkohleproduktion mit CCS und Energienutzung oder landwirtschaftliche Praktiken mit Anpassungsnutzen), allfällige positive Nebeneffekte aber auch Ressourcenkonflikte (z.B. Nutzung von Landflächen für energetische Biomasse vs. andere Produkte), sowie Risiken (z.B. Gesundheitsfolgen von Mineralstaub, CO₂-Leckagen) zu identifizieren. Wichtig sind die breite Information und der frühzeitige Einbezug der Bevölkerung in solche Projekte, um mittels Transparenz auch deren Akzeptanz zu fördern. Zudem ist eine Zusammenarbeit verschiedener Akteure notwendig, um die Systemgrenzen zu definieren, Doppelzählungen auszuschliessen, sowie um die Lebenszyklus-CO₂-Bilanz unterschiedlicher Umsetzungsvarianten genau berechnen zu können.

Stadt und Kanton Zürich müssen mögliche Formen öffentlich-privater Kooperation erörtern und eine Diskussion über die Vor- und Nachteile verschiedener Politikinstrumente anstossen.

In diesem Kontext ist insbesondere zu klären, wie die —bei einer Reihe von Massnahmen signifikanten - gesamtwirtschaftlichen Kosten auf Anwender, öffentliche Hand oder Endkonsumenten verteilt werden könnten, ohne dass es zu untragbaren Lasten und negativen Verteilungseffekten kommt.

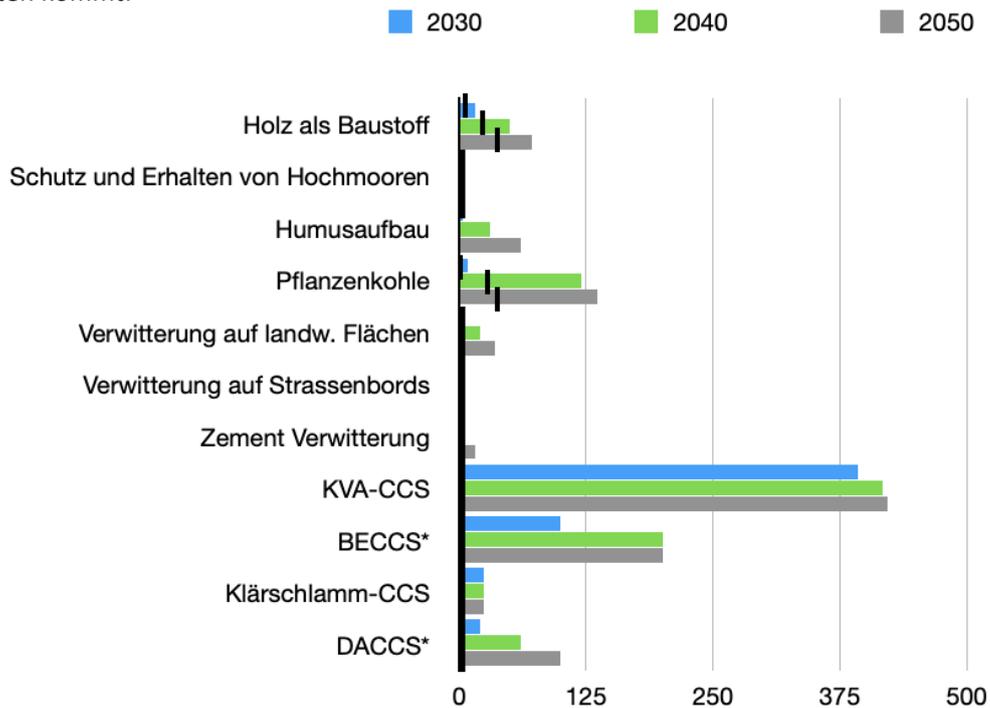


Abbildung 1: Grössenordnung der im optimistischen Szenario (farbig) oder pessimistischen Szenario (schwarze Begrenzungsstriche) für den Kanton Zürich (inkl. Stadt) projizierten Potenziale der analysierten Ansätze zur CO₂-Entfernung (in 1000 tCO₂/a).

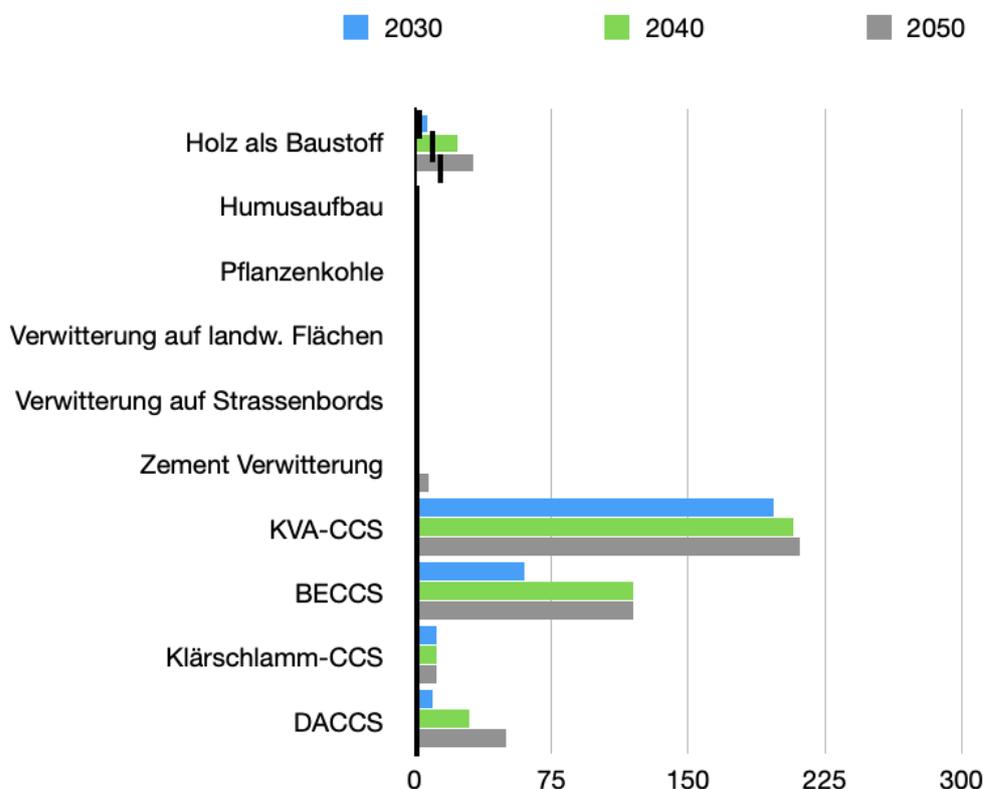


Abbildung 2: Grössenordnung der im optimistischen Szenario (farbig) oder pessimistischen Szenario (schwarze Begrenzungsstriche) für die Stadt Zürich projizierten Potenziale der analysierten Ansätze zur CO₂-Entfernung (in 1000 tCO₂/a).

Die mögliche Rolle des Handels mit Treibhausgas-Zertifikaten

Das Konzept des Treibhausgas (THG)-Zertifikatehandels erlaubt es Akteuren, durch Zahlungen zur Finanzierung von THG-mindernden oder THG-speichernden Investitionen eigene Emissionen zu kompensieren. Dies kann z.B. durch den Bau und Betrieb von Biogasanlagen in Entwicklungsländern geschehen. Damit können vorhandene Unterschiede in den Kosten z.B. zwischen Industrie- und Entwicklungsländern genutzt werden. Dafür braucht es ein geeignetes Regelwerk und eine Buchhaltung für THG-Zertifikate. Es gibt Zertifikatssysteme für den internationalen Handel wie auch für den Handel innerhalb der Schweiz. Zertifikate können aus Emissionsreduktionen (z.B. Nutzung von Biogas) wie auch CO₂-Senkenleistungen (z.B. technische Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂) stammen.

Ein solches Instrument könnte auch für den Kanton oder die Stadt Zürich auf dem Weg zu Netto-Null eine Rolle spielen. In der Praxis zeigen sich bei den bestehenden Zertifikatmärkten beträchtliche Schwierigkeiten in der Umsetzung und Nutzung dieses Marktprinzips, um tatsächlich wirksame und langfristig gesicherte Emissionsreduktionen zu erzielen. Wichtige Herausfor-

derungen liegen in der Sicherstellung der Zusätzlichkeit von Minderungsaktivitäten («Additionalität») und in der Bestimmung der Referenzentwicklung («Baseline»). Hier kann die Beschränkung auf gewisse Projekttypen mit besserer Additionalität helfen, tatsächlich zusätzliche Zertifikate zu generieren.

Mit dem Abkommen von Paris (2015) haben sich alle Länder zu Klima-Aktivitäten verpflichtet. Damit ändern sich die grundlegenden Spielregeln für internationale Zertifikatsmärkte. Eine Studie (IETA 2019) zeigt auf, dass unter einem Szenario von moderater Dekarbonisierung, die in allen Ländern parallel stattfindet, die Preisunterschiede zwischen den Ländern mit fortschreitender Dekarbonisierung verschwinden. Hier bringt der Zertifikatshandel temporär einen Nutzen, bevor die Konvergenz der Preise ihn zum Erliegen bringt.

Von der Menge her dürften Schweizer Akteure in der Lage sein, mittelfristig jede benötigte Menge an internationalen Zertifikaten zu erstehen, da die Kaufkraft der Schweiz relativ hoch ist. Es dürfte jedoch noch einige Jahre dauern, bis Zertifikate aus den neuen Artikel-6-Mechanismen in geeigneter Qualität zur Verfügung stehen, da insbesondere die Regierungen der Gastländer institutionelle Hürden überwinden müssen, welche durch die neue und dezentralere Architektur des Pariser Abkommens entstehen. Für solche Zertifikate werden Zertifikatspreise im Bereich 10 – 50 USD/tCO₂e für den Zeitraum bis 2030 geschätzt. Für Zertifikate aus Minderungsaktivitäten, welche hohen Massstäben bezüglich Umweltintegrität (inklusive Additionalität, Ausschluss der Doppelzählung und des Kaufs von «Hot air») und generellen Nachhaltigkeitsstandards genügen, dürften die Preise wohl eher am oberen Rand dieses Bereiches liegen. Bei einer umfassenden globalen Umsetzung des Abkommens von Paris dürften die Zertifikatspreise nach 2030 stark steigen. Vom Kauf von CDM-Zertifikaten aus dem früheren Kyoto-Protokoll nach 2020 wird abgeraten.

Grundsätzlich sollten aber Kantone und Städte zunächst ihre mögliche Rolle gegenüber dem Bund im internationalen Zertifikatshandel klären und ihre Strategien koordinieren, um effizient zu bleiben. Auch die Finanzierung solcher Instrumente wird kaum in einem kantonalen oder städtischen Alleingang in signifikantem Umfang erreicht werden können.

Ohne strenge Kriterien für Umweltintegrität in der Wahl der Zertifikate und in der Durchführung hat der Zertifikatehandel kaum einen Effekt, respektive kann zu einer Netto-Zunahme der globalen Emissionen führen. Nur bei strengen Kriterien auch bezüglich Nachhaltigkeitsnutzen führt der Handel mit Zertifikaten zu einem Nutzen für Käufer- und Gastland sowie für die Atmosphäre.

Ein Ansatz für die Stadt könnte auch die vermehrte Nutzung von Synergien sein mit ihren Entwicklungshilfeaktivitäten, welche eine Klimaschutzkomponente aufweisen. Die Emissions-

mindernde Wirkung von Aktivitäten wie z.B. die Verbesserung des öffentlichen Verkehrs in Entwicklungsländern kann quantifiziert werden und als Beitrag an die Zielerreichung des Gastlandes rapportiert werden.

Trotz dieser Nachteile und Herausforderungen, die sich in Bezug auf Zertifikate aus *Minderungsleistungen* stellen, kommt die Schweiz sowie Kanton und Stadt Zürich im Hinblick auf ein Netto-Null-Ziel mittelfristig kaum um die Verwendung von internationalen Zertifikatsmärkten für *Negativemissionstechnologien (NETs)* herum, da deren Potenzial in der Schweiz und im Kanton kaum ausreichen wird (siehe Teil 1) zur Kompensation der Restemissionen und insbesondere das Problem der geologischen Speicherung des CO₂ in der dichtbesiedelten Schweiz auf Akzeptanzprobleme stossen dürfte. Es besteht deshalb ein langfristiges Interesse am Aufbau von robusten und funktionierenden Zertifikatsmärkten. Hier spielt der Bund mit den Pilotaktivitäten zu Artikel-6-Projekten eine wichtige Pionierrolle. Bei allen Zertifikaten aus Negativemissionstechnologien sind technische, methodische und versicherungstechnische Vorkehrungen zur grösstmöglichen Permanenz der Zertifikate zu erheben. Als Vorschlag könnten Zertifikate mit unsicherer Permanenz auch nur zur Kompensation von indirekten Emissionen z.B. grauen Emissionen aus dem Konsum verwendet werden.

Neben dem internationalen Zertifikatshandel besteht in der Schweiz auch ein Handel mit Bescheinigungen aus Kompensationsprojekten. Für Minderungsprojekte stellt dieser Inlandhandel in der Regel ein wenig effizientes Instrument dar. Mittelfristig dürfte dieser auch zu vermehrten Doppelzählungsproblemen führen, da Kantone und Städte mit Dekarbonisierungsplänen sich diese Minderungspotentiale auf dem eigenen Territorium nicht anrechnen lassen können, da diese an die Treibstoffimporteure verkauft wurden. Im Inland dürfte der Fokus deshalb in Zukunft auf Kompensationsprojekten aus Senkenaktivitäten liegen.

Einleitung

Der vorliegende Bericht *Negative Emissionen und Treibhausgas-Zertifikatehandel: Potenziale, Kosten und mögliche Handlungsoptionen* geht auf die Möglichkeiten zur CO₂-Entfernung und des internationalen und nationalen Handels von Treibhausgas-Zertifikaten für die Erreichung von Netto-Null Emissionen in der Stadt Zürich sowie im Kanton Zürich ein.

In Bezug auf die Stadt Zürich stellt der Bericht eine Ergänzung zum Bericht «Netto-Null Treibhausgasemissionen Stadt Zürich (Phase 1) Zielbilder, Politikmassnahmen und Auswirkungen für die energie- und konsumbedingten Treibhausgasemissionen» dar.

In Bezug zum Kanton Zürich hat der Regierungsrat in die Richtlinien der Regierungspolitik 2019-2023 das neue Langfristziel LFZ 6 aufgenommen: «Der Ausstoss der Treibhausgase ist im Rahmen des Pariser Abkommens soweit gesenkt, dass ein Beitrag zur notwendigen Begrenzung des globalen Klimawandels geleistet wird». Dazu wurde die Massnahme RRZ 7a formuliert, welche die Definition einer «langfristigen Klimastrategie und ein Vorgehen zur Dekarbonisierung» verlangt. Aufgrund dieser neuen Ausgangslage entwickelt der Kanton Zürich eine langfristige Klimastrategie, um die zunehmende Herausforderung des Klimawandels wirkungsvoll und weit-sichtig angehen zu können. Der vorliegende Bericht ist Teil der Grundlagenarbeiten zur Entwicklung der langfristigen Klimastrategie des Kantons.

Auch der Bund ist zur Zeit daran, eine langfristige Klimastrategie mit Blick auf das Netto-Null-Ziel 2050 zu formulieren, diese sind jedoch zum heutigen Zeitpunkt (Juni 2020) noch nicht abgeschlossen.

Der Bericht ist in zwei Teile gegliedert: Teil 1 erörtert die mögliche Rolle der CO₂-Entfernung, also der sogenannten «Negativen Emissionen», währenddessen Teil 2 sich der Rolle von Kompensationszertifikaten aus Aktivitäten in In- und Ausland widmet.

Der politische Vorstoss des Zürcher Gemeinderates, bis 2030 den CO₂-Austoss auf Netto-Null zu senken, reiht sich in eine zunehmende Zahl von politischen Forderungen für ähnliche Ziele verschiedener Akteure ein. So haben seit 2018 eine Reihe von Staaten und subnationalen Akteuren wie Regionen und Städte als auch Unternehmen und andere nichtstaatliche Akteure mehr oder minder konkrete Pläne vorgestellt, bis gegen Mitte des Jahrhunderts CO₂- oder gar klimaneutral zu werden. Der zunehmende öffentliche Druck durch die Klimastreikbewegung hat in letzter Zeit zu einer beschleunigten Einführung von Klimaneutralitätszielen geführt.¹ Die grundsätzliche Notwendigkeit, global CO₂- oder Klimaneutralität zu erreichen, ist in der Forschung begründet (IPCC, 2014b, 2018) sowie im Pariser Abkommen verankert.

Da ein Teil der Treibhausgasemissionen voraussichtlich nicht eliminiert werden kann (z.B. aufgrund von Lachgasemissionen beim Düngemittleinsatz in der Landwirtschaft oder aufgrund

¹ Für eine Auflistung angekündigter Neutralitätsbekundungen siehe UNFCCC (2020), CNCA (2020), CNC (2020) und Darby (2019).

unvermeidbarer Industrieprozessemissionen z.B. durch chemische Umwandlungen), erfordert die Erreichung von Netto-Null-Emissionen gezwungenermassen eine Kombination aus 'herkömmlichen' Emissionsreduktionen sowie der Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre durch sogenannte Negativ-Emissions-Technologien (NETs). Dabei ist jedoch unklar, wie gross der Beitrag der NETs effektiv sein kann und wie teuer ihr Einsatz ist, da die meisten Ansätze bisher kaum in der Praxis umgesetzt worden sind. Es ist zu erwarten, dass Emissionsreduktionen, wie auch NETs im Ausland verfolgt werden könnten und in Form von Kompensationszertifikaten einen Beitrag an ein Netto-Null-Ziel der Stadt oder des Kantons Zürich leisten können (s. Teil 2).

Teil 1: Rolle von Negativen Emissionen

Teil 1 dieses Berichts bietet eine erste Übersicht über die im Zürcher Kontext möglicherweise umsetzbaren NETs, eine Einschätzung zu deren allfälligem Potenzial und damit ggf. verbundenen Kosten. Aufgrund mangelnder Erfahrung, auch im internationalen Kontext, bestehen nur wenige Orientierungswerte, und viele Werte in der wissenschaftlichen Literatur basieren auf Extrapolation und Expertenschätzungen. Wenn auch diese Unsicherheiten eine robuste Analyse erschweren, empfiehlt dieser Bericht konkrete nächste Schritte, um die identifizierten Ansätze zu konkretisieren, deren Potenziale sowie Vor- und Nachteile unter den spezifischen lokalen Bedingungen herauszuarbeiten und damit eine Grundlage für die politische Planung der Umsetzung der Zürcher Netto-Null-Emissionsstrategien zu schaffen.

1.1. Sechs Kategorien von NETs

Der Teilbericht beschreibt sechs Kategorien von NETs, angefangen mit primär naturbasierten Ansätzen, gefolgt von technologischen Massnahmen (s. Tabelle 2). Der Bericht klammert Ansätze aus, für die es aus Zürcher Sicht eindeutig keine direkten Umsetzungsmöglichkeiten gibt (insbesondere betrifft dies ozeanbasierte Massnahmen wie die Meeresdüngung mit Eisen). Die Einschätzung möglicher Potenziale und Kosten geschieht – wo sinnvoll möglich – mit einer territorialen Fokussierung auf die Stadt und/oder den Kanton. Einzelne NETs, welche z.B. grössere Flächen bedürfen, wären demnach nur auf Kantonsgebiet denkbar (z.B. Lagerstätten für geologische CO₂-Speicherung, Flächen zur Wiedervernässung oder zum Moorschutz). Der Wissensstand bezüglich der nachfolgend aufgeführten Ansätze (bzw. die Unsicherheiten bzgl. deren Potenzial) unterscheidet sich teilweise stark, die wichtigsten Unsicherheiten werden in den jeweiligen Abschnitten beschrieben:

Tabelle 2: Die in diesem Bericht berücksichtigten NETs Ansätze.

NETs im Forstsektor
Nutzung von Holz-Biomasse für die Energiegewinnung mit CCS (s. Teil BECCS unten)
Steigerung der Holznutzung als Baustoff
Erweiterung und Verdichtung der Waldfläche
Moorschutz und Wiedervernässung
Moorschutz
Wiedervernässung organischer Böden
NETs in der Landwirtschaft
Verschiedene Ansätze zur Steigerung des Bodenkohlenstoffgehaltes
Agroforstwirtschaft
Einbringen von Pflanzenkohle
Beschleunigte Verwitterung
Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen
Ausbringung auf Grünstreifen und Strassenrändern
Verwitterung von Recycling-Zement
Biomasseverwertung mit CCS
Biomassekraftwerk mit CCS (BECCS)
Kehrichtverwertungsanlagen (KVAs) mit CCS
Direktes CO₂ Einfangen und CCS (DACCS)

1.2. Wissensgrundlage und Vorgehen

Die Schätzungen von Potenzialen und Kosten basieren auf der Auswertung bestehender Daten und Experteneinschätzungen. In manchen Fällen werden Annahmen in Bezug auf künftige Entwicklungen getroffen und transparent erläutert. Als Ausgangsbasis dient die internationale Fachliteratur, welche eine erste, grobe Einordnung zu Potenzialen (z.B. in Abhängigkeit verfügbarer Flächen) und Kosten, dem Forschungsstand sowie – soweit verfügbar – Erfahrungswerte zur praktischen Umsetzung ermöglicht. Die aus der internationalen Literatur gewonnenen Daten liefern jedoch lediglich globale Durchschnittswerte, welche teilweise auf einer Fülle unterschiedlicher Annahmen berechnet wurden, sodass zur kontextspezifischen Ableitung für Stadt und Kanton Zürich zusätzliche Annahmen getroffen werden mussten. Dazu wurden 10 Gespräche mit Expertinnen und Experten aus dem Grossraum Zürich durchgeführt, um eine Einbettung in den lokalen Kontext zu gewährleisten. Zusätzlich sind bei den bisher am wenigsten entwickelten NETs auch Überlegungen aus der Innovationsforschung zu Rate gezogen worden, wobei z.B. eine erfolgreiche Aufskalierung neuer Technologien üblicherweise einer logistischen Wachstumskurve folgt. Bei NETs mit internationalen Erfahrungswerten werden die Werte für den Kanton bzw. die Stadt Zürich in einer Mischrechnung aus verschiedenen Faktoren interpoliert.

Die Kosten werden als geschätzte Durchschnittskosten je entfernter Tonne CO₂ dargestellt. In einigen Fällen könnten diese null oder gar negativ ausfallen, da die Massnahmen bei einer wirtschaftlichen Gesamtrechnung dank anderweitigen Kosteneinsparungen attraktiv sein könnten. Das bedeutet aber nicht, dass solche Massnahmen automatisch bzw. ohne Eingriff der öffentlichen Hand umgesetzt würden, da diverse Barrieren (u.a. regulatorische Barrieren, fehlende Information, fehlende Finanzierung, asymmetrische Anreize oder fehlende Koordination) im Weg stehen könnten.

Die Potenzialuntersuchung wird in zwei Teilen geführt: Einerseits wird ein *technisches Potenzial* geschätzt, welches das maximal mögliche technisch-materielle Potenzial einer NET abbilden soll, wo ausschliesslich der Bedarf nach und das Vorhandensein von Ressourcen (z.B. Land, Wasser, Energie) sowie die CO₂-Speichermöglichkeiten Grenzen setzen. Die technischen Potenziale sind weitgehend durch jeweils einen einzelnen limitierenden Faktor definiert, der zwischen den Ansätzen variiert. Beispiele hierfür sind die Biomasseverfügbarkeit für BECCS, die Verfügbarkeit grosser Materialmengen für die beschleunigte Verwitterung oder die (CO₂-freie) Stromverfügbarkeit für DACCS.

Demgegenüber berücksichtigt das *reale Potenzial* zusätzlich gewisse «weiche» Faktoren, wie die technische Skalierbarkeit neuer Technologien, gesellschaftliche Akzeptanz, Konflikte und Synergien in Bezug auf die nachhaltige Entwicklung, die Geschwindigkeit der Umsetzung neuer Praktiken sowie sozio-ökonomische und politische Chancen und Risiken. Hierbei benennt der Bericht jeweils, welche Faktoren limitierend wirken und in welcher Grössenordnung das Anwendungspotenzial unter den genannten Annahmen liegt. Beispiele sind die möglicherweise fehlende Unterstützung und Akzeptanz von CCS im Inland bzw. von CO₂-Transportinfrastruktur in der Schweiz oder Schwierigkeiten, Veränderungen in der Landwirtschaft für die Steigerung von Bodenkohlenstoff rasch umzusetzen. Die Abschätzungen der damit verbundenen Kosten stützen sich mangels praktischer Erfahrungswerte weitgehend auf Literaturwerte, wobei diese – wo angebracht – an den Schweizer Kontext angepasst werden. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit den verschiedenen limitierenden Faktoren erfolgt im Anschluss an die Szenariendiskussion, um die Handlungsoptionen (zur Anreizsetzung und Implementierung) zu konkretisieren.

Im Folgenden werden die NETs – beginnend mit den naturbasierten und gefolgt von technologischen NETs – in jeweils drei Unterabschnitten diskutiert. Der erste Unterabschnitt präsentiert den aktuellen Wissensstand auf Basis der internationalen Literatur. Daran anschliessend folgt eine Beschreibung des Ist-Zustandes im Kanton und/oder in der Stadt Zürich, woran sich die Projektion der Kosten und Potenziale anschliesst. Jeder Abschnitt wird mit einigen Handlungsempfehlungen abgeschlossen.

2. Wald und Holz

Wälder und Holz stellen einen CO₂-Speicher dar. Prinzipiell können Wälder und Holznutzung als Senke agieren, wenn:

- Holzbestände im Wald zunehmen,
- Holz vermehrt als (Bau-)Material genutzt wird, und
- Holz vermehrt als Energieträger mit CCS eingesetzt wird.

2.1. Wissensstand

Dem Forstsektor kommt im Kontext von negativen Emissionen eine besondere Funktion zu. So fungieren viele Waldflächen einerseits heute schon als CO₂-Senke (dort, wo Waldflächen oder die Biomasse-Dichte zunehmen), andererseits kann die Produktion von Holz als Grundlage für weitere Senkenmassnahmen dienen (Bioenergie mit CCS, Pflanzenkohle oder Holz als Baustoff).

Wälder, die einen stabilen Holzbestand haben, stellen zwar einen CO₂-Speicher dar, nehmen aber langfristig weder CO₂ auf noch geben sie welches ab. Daher muss – abgesehen von Aufforstungen und dem allfälligen Verwalden von (Landwirtschafts-)Flächen – der Fokus auf den Erhalt des bestehenden CO₂-Speichers² sowie der gezielten Nutzung des Holzes gelegt werden.

Der Walderhalt an und für sich erfordert natürlich auch gewisse Massnahmen. Da diese aber der Verhinderung von Emissionen dienen (und nicht der CO₂-Entfernung), werden diese hier nicht weiter erörtert.³

Bei der Nutzung von Holz sollte auch im Kontext allfälliger Senkenleistungen eine Priorisierung anhand verschiedener Holzqualitäten berücksichtigt werden. Wo möglich und sinnvoll sollte die Ressource Holz primär als Baustoff bzw. Industriestoff genutzt werden. Nur wo keine andere Verwendung sinnvoll ist, ist eine direkte energetische Verwertung angeraten.

² Im internationalen Kontext ist die Permanenz – also die langfristige Speicherung – eine grosse Herausforderung und darf nicht als gesichert angenommen werden. Erfahrungen mit internationalen Klimaschutz-Forstprojekten (auch im Kontext von Walderhalt durch REDD+) zeigen die Vulnerabilität von Waldspeichern gegenüber politischen Umschwüngen und wirtschaftlichem Druck, wobei Landnutzungsveränderungen und Abholzung gespeichertes CO₂ wieder freisetzen. In der Schweiz ist der Waldschutz sehr gut verankert, sodass die gesamtschweizerische Waldfläche zwischen 2006 und 2013 leicht zugenommen hat (BAFU, 2018).

³ Qualität, Alter und Stabilität der Waldflächen in der Schweiz sind zwar mit internationalen Durchschnittswerten kaum direkt vergleichbar, dennoch erlaubt ein solcher Vergleich aber zumindest, Grössenordnungen in Bezug auf die Potenziale und Kosten gegenüberzustellen. Die internationale Literatur geht davon aus, dass durch Massnahmen im Forstsektor zur Erhaltung bzw. Steigerung der Senkenfunktion jährlich rund 0,5 bis 7 GtCO₂ gemindert werden könnten (auf schweizerische Flächen heruntergebrochen würde dies einer Grössenordnung von 3 MtCO₂/a entsprechen). Gerade bei den erwarteten Kosten gehen die Schätzungen von zwischen 0 und 240 USD/tCO₂ weit auseinander (für die Schweiz liegen die Kosten zwischen 1 und 100 CHF/tCO₂) (Fuss et al., 2018; Akademien der Wissenschaften, 2018; Beuttler et al., 2019).

2.2. Ist-Zustand für den Kanton Zürich

Im Kanton Zürich nimmt der Wald rund 28% der gesamten Kantonsfläche ein, was ungefähr 50.000 ha entspricht⁴. Es ist damit zu rechnen, dass die Waldfläche bis zum Jahr 2025 konstant bleibt (ALN, 2015), während sich der durchschnittliche Holzvorrat von rund 20 Millionen m³ (in 2010) auf 19 Mio. m³ (in 2025) reduzieren wird. Als langfristiges Ziel wird ein Gleichgewicht angestrebt, sodass der Holzvorrat im Wald auf lange Sicht CO₂-neutral ist: So standen einem Zuwachs von 10,6 m³/ha (in 2010) noch eine Nutzung von 13,3 m³/ha gegenüber, wohingegen sich Zuwachs und Nutzung in 2025 bei rund 12 m³/ha ausgleichen sollen.

Beim Holzverbrauch geht man von einer konstanten jährlichen Verwendung von rund 1,2 Mio. m³ bis 2025 aus, wobei insbesondere der Anteil des Energieholzverbrauchs, auf 0,2 Mio. m³/a steigen soll (ALN, 2020, 2015). Der Anteil von Stammholz und Energieholz ist miteinander vergleichbar (0,16 Mio. m³ und 0,18 Mio. m³ im Jahr 2016), derjenige von Industrieholz liegt deutlich unter diesen Werten (24.000 m³). Bei diesen Zahlen ist jedoch nicht bekannt, wie gross der Anteil an langfristig z.B. in Gebäuden verbautem Holz ist. Zudem erfolgt die Energieholznutzung heute ohne den Einsatz von CCS, sodass diese eine CO₂-arme Nutzung und keine CO₂-Senke darstellt.

2.3. Ist-Zustand für die Stadt Zürich

In der Stadt Zürich umfasst der Wald eine Fläche von ungefähr 2225 ha (knapp 25% der Stadtfläche)⁵. Die Holznutzung aus Stadtzürcher Wald umfasst ca. 18.000 m³, davon ca. die eine Hälfte als Energieholz und die zweite Hälfte verbaut oder zu Holzprodukten verarbeitet (Grün Stadt Zürich, 2020). Der Stadtzürcher Waldbestand ist über mehrere Dekaden hinweg stabil und damit CO₂-neutral; insofern kann ausschliesslich die allfällige Nutzung von Energieholz (mit CCS) oder Bauholz (bei späterer energetischer Verwertung mit CCS) zu einer Senke führen. Zur durchschnittlichen Nutzungsdauer von Bau- und Industrieholz sind keine spezifischen Zahlen bekannt.

2.4. Kosten und Potenziale

Die Landnutzung und nachhaltige Forstwirtschaft geben die Potenzialgrenzen von Flächenveränderungen und Verdichtung des Waldes vor: Als optimistisches Szenario nehmen wir an, dass die Holzvorräte ab 2025 über die folgenden Jahrzehnte konstant bleiben, während das pessimistische Szenario von einer leichten Abnahme des Holzvorrates im Kanton von jährlich 1% ausgeht.⁶

⁴ Der Grossteil dieser Waldflächen sind in Privatbesitz (47%), gefolgt von Gemeinden (33%), Holzkooperationen (12%), Kanton (17%) und Bund (1%) als weiteren Eigentümern. Der öffentlichen Hand als aggregierter Akteurin aus Gemeinden, Kanton und Bund stehen somit rund 20.500 ha zur eigenen Nutzung und Bewirtschaftung zur Verfügung.

⁵ Eigentümer sind die Stadt Zürich (63%), Holzkooperationen (20%), Privatpersonen (9%) und der Kanton Zürich (8%). Stadt und Kanton haben somit direkten Einfluss auf 1.600 ha (Tiefbau- und Entsorgungsdepartment der Stadt Zürich, 2020).

⁶ Dies entspricht einem etwas grösseren Rückgang als die historische Veränderung im Mittelland zwischen 2006 und 2013 (Rückgang des Holzvorrates im Mittelland von rund 4%).

Dies entspräche einer Emission von 175.000 tCO₂/a, die für Netto-Null anderswo auszugleichen wäre. Die positive Annahme deckt sich hierbei mit der Projektion bis 2025 des Zwischenberichts zur Waldentwicklung (ALN, 2015). Zürcher Wälder besitzen kein Potenzial zu einer Erhöhung der Holzbestände, Wälder in anderen Kantonen (insbesondere in wenig besiedelten Bergkantonen) haben ihre Holzbestände jedoch aufgrund zunehmender Verwaldung (abnehmende Bevölkerung) kontinuierlich vergrössert. Sollten Veränderungen in den Holzbeständen anderer Kantone anteilig anrechenbar sein (dies müsste wohl auf nationaler Ebene geklärt werden, um Doppelzählungen der Kantone zu vermeiden), könnte eine Zunahme der schweizerischen Holzvorräte bis 2030 von insgesamt rund 1,4 Mio. m³/a (bzw. einer Senke von ca. 1,3 Mio. tCO₂/a)⁷ erfolgen, welche einer Senke von 60.000 tCO₂/a anteilig für die Stadtbevölkerung und 230.000 tCO₂/a für die Bevölkerung des Kantons⁸ entsprechen würde. Diese Rate würde im Zeitverlauf wohl abflachen und 2040 möglicherweise nur noch ein Drittel betragen und 2050 ganz auf null sinken. Das pessimistische Szenario geht demgegenüber von Anfang an von einer Nullbilanz aus, da die Anrechnung der Zunahme in anderen Kantonen kaum realistisch ist und zudem verstärkte Klimaschäden eine Akkumulation von Holzvorräten unmöglich machen könnten. Die Waldpolitiken des Bundes und in den Kantonen sind zudem nicht auf eine Steigerung der Holzvorräte ausgerichtet.

Das Potenzial des Waldes im Bereich der CO₂-Entfernung liegt demnach primär in der Produktion von Holz als Baumaterial sowie als Energieträger in mit CCS betriebenen Anlagen (das Potenzial von letzterem wird separat im Kapitel zu BECCS besprochen). Dabei ist eine Ausrichtung auf schnellwachsende Spezies mit dem alleinigen Ziel des Klimaschutzes oder der Energieholzgewinnung ausgeschlossen, da hierbei andere Ziele der Ökologie und die Widerstandsfähigkeit des Waldes vernachlässigt werden, was letztlich auch den Klimaschutz beeinträchtigen würde.

Das Senkenpotenzial der Nutzung von Holz als Baumaterial hängt von der Nutzungsdauer der entsprechenden Produkte sowie nach deren Ende einer Verwertung ab, welche zu einer permanenten Speicherung von CO₂ (beispielsweise durch Verwertung in einer BECCS-Anlage) führt. Um die Nutzung von Holz als eine Form der CO₂-Entfernung voranzutreiben, ist eine – zumindest auf den Kohlenstoff bezogene – Lebenszyklusanalyse der verschiedenen Nutzungsformen vonnöten. Darüber hinaus wäre eine statistische Erfassung notwendig, um die Mengen in der BECCS- oder KVA-CCS-Verfeuerung (und deren CO₂-Entfernungswirkung) zu quantifizieren.

Eine Steigerung der Nutzung von Holz als Baustoff erfordert primär Erfahrungsaustausch, Verhaltensänderungen sowie regulatorische Veränderungen, welche z.B. über Baustandards den

⁷ 1 m³ Holz wiegt durchschnittlich 0.5 t, welche zur Hälfte aus Kohlenstoff besteht (also 0.25 tC). Bei Oxidation entstehen daraus 0.917 tCO₂.

⁸ Schweizer Bevölkerung (2018): rund 8.5 Mio.; Kantonsbevölkerung (2018): rund 1.5 Mio.; Stadtbevölkerung (2018): rund 0.4 Mio.

Einsatz von Holzbauweisen vorantreiben (siehe auch Handlungsoption «Kohlenstoffarme Baumaterialien in Hoch- und Tiefbau (ÖB-2)» in der Grundlagenstudie *Handlungsfelder zur Dekarbonisierung des Kantons Zürich* (Füssler et al. 2020)). Wir gehen davon aus, dass die verfügbaren Mengen an Bauholz nicht limitiert sind, da diese – wo notwendig – auch aus dem Ausland beschafft werden können⁹ und der Ort der Entstehung in diesem Zusammenhang nicht ausschlaggebend ist (solange Transportemissionen korrekt verrechnet werden). Daher ist das technische CO₂-Entfernungspotenzial von Holz als Baumaterial durch die bautechnischen Möglichkeiten (und die Erneuerungsrate von Gebäuden) limitiert; über 90% der Gebäude bis 5 Stockwerke könnten möglicherweise auf Massivholzbauweise zurückgreifen.¹⁰ Unter Annahme von Durchschnittswerten¹¹ wird das technische CO₂-Entfernungspotenzial im gesamten Kanton auf rund 170.000 tCO₂ und 78.000 tCO₂ in der Stadt projiziert, wobei hier näherungsweise angenommen wird, dass die mit der Verarbeitung verbundenen Emissionen mit denen anderer Bauweisen vergleichbar sind. Bei einer genaueren Erörterung der CO₂-Bilanz müssten hier spezifischere Werte eingesetzt werden.

Das realistische Potenzial bemisst sich an der (langsamen) Durchsetzung in der Baupraxis.¹² Da die Holzbauweise in den Fällen in denen sie bisher zur Anwendung gekommen ist, zumeist preisgünstiger als Alternativen war, geht das optimistische Szenario von Minderungskosten um 0 CHF aus. Das pessimistische Szenario geht von zusätzlichem Aufwand von 50 CHF/tCO₂ aus.

⁹ Dies muss vor dem Hintergrund der steigenden Nachfrage nach Holz zu Kompensationszwecken genau verfolgt werden und es müssen zudem Massnahmen ergriffen werden, die eine Doppelzählung ausschließen.

¹⁰ Erste Erfahrungen in Frankreich mit Politikmassnahmen und Demonstrationsprojekte an anderen Orten zeigen, dass – bei entsprechender architektonischer Planung – auch vielstöckige Bauwerke weitgehend aus Holz erstellt werden können. Siehe auch Reid et al. (2004) zu einer globalen Analyse des Potenzials der Holzbauweise.

¹¹ Annahme einer jährlichen Neubaurate im Kanton Zürich in der Grössenordnung von 3000 Gebäuden/a; 1350 Gebäuden in der Stadt; durchschnittliche Verwendung von 40kg Holz je m³ Gebäudevolumen; durchschnittliches Gebäudevolumen ca. 800 m³; Kohlenstoffgehalt des Holzes 50% (3.6-faches Molargewicht von CO₂ ggü. C).

¹² Das optimistische Szenario rechnet mit einer Steigerung bis 2030 auf ca. 20% des technischen Potenzials; 60% bis 2040 und 90% bis 2050. Das pessimistische Szenario rechnet mit einem Drittel davon.

Tabelle 3: Schätzungen zu den Kosten und Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernungsansätze in Bezug auf Wald und Holz (Werte für den Kanton inkl. Stadt)

Massnahme			Anrechnung der zunehmenden schweizweiten Holzbestände			Nutzung von Holz als Baustoff		
Technisches Potenzial	Stadt		0 (in Kanton & Stadt); ausschliessliche Anrechnung der in anderen Kantonen tendenziell zunehmenden Holzbestände			78.000 tCO ₂ 170.000 tCO ₂		
	Kanton (inkl. Stadt)							
Limitierende Faktoren			Abnehmende Waldfläche im Mittelland; ggf. Anrechnung Wälder anderer Kantone (nach Einwohnerzahl)			Bautechnische Möglichkeiten und Adoption der Holzbauweise		
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO₂ / a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	1	7	10
		Kanton	0	0	0	5	16	24
	optimistisch	Stadt	60	30	0	7	23	32
		Kanton	230	115	0	16	50	72
Kosten (CHF / tCO₂)	pessimistisch		0**	0**	0**	50	50	50
	optimistisch		0**	0**	0**	<0*	<0*	<0*

* Holzbauweise kann preisgünstiger als Alternativen sein, das optimistische Szenario geht daher von negativen Minderungskosten aus.

** Das Anrechnen ausserkantonaler Senkenleistungen könnte prinzipiell mit einer finanziellen Entschädigung verbunden werden.

2.5. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Die wichtigste Aufgabe der öffentlichen Hand in der Forstwirtschaft ist das Sicherstellen der Leistungen des Waldes und damit indirekt auch der Schutz des Kohlenstoffspeichers durch Erhalten der aktuellen Waldflächen.

Darüber hinaus könnten gezielte Massnahmen die verstärkte Nutzung von Holz im Bau (mit einer Perspektive auf die permanente Speicherung des Kohlenstoffes nach Lebensende von Gebäuden) fördern (siehe auch Handlungsoption 7.2.2 «Kohlenstoffarme Baumaterialien in Hoch- und Tiefbau (ÖB-2)» in Füssler et al. 2020). Ebenso sollte die Nutzung von Biomasse in der kombinierten Strom- und Wärmegewinnung mit angegliederter Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) angestrebt werden (siehe nachfolgendes Kapitel zu BECCS). Dabei sollten langfristig auch das Bau- und Industrieholz nach Ablauf seiner Nutzungsdauer in Anlagen mit CCS verwertet werden¹³.

¹³ Zur Reduktion der Emissionen gibt es wohl weitere Massnahmen wie das Schliessen von Wertschöpfungsketten im Inland und andere Verwendungen von Holz, welche in der übergeordneten Planung in Bezug auf Emissionsminderungen und Senken im Sinn der gesamtheitlichen Betrachtung berücksichtigt werden sollten.

Wie gross – von der heutigen Nutzung von Holzprodukten ausgehend – das Senkenpotenzial der Forstwirtschaft durch eine verstärkte Nutzung von Holz als Baumaterial und für Energieholz mit Kohlenstoffabscheidung effektiv sein könnte, ist angesichts der beschränkten Holzressourcen zur Nutzung für verschiedene Zwecke nicht abschliessend geklärt. Hierzu könnte eine angewandte Studie zu den systemweiten Holzstoffflüssen im Kanton bzw. der Stadt Zürich Aufschluss geben.

3. Erhalten bestehender Moore und Wiedervernässung früherer Moorflächen

Allfällige Potenziale für die CO₂-Entfernung durch die Erhaltung von Mooren und die Wiedervernässung ehemaliger Moorflächen können nur grob abgeschätzt werden. Um die Senkenwirkung solcher Massnahmen robust abschätzen zu können, wären Studien mit einem Zeithorizont mehrerer Jahrzehnte notwendig. Hinzu kommt, dass gerade bei der Wiedervernässung verschiedene gegensätzliche Effekte bzgl. Treibhausgas-Emission und -Entfernung zu erwarten sind.

Auf Stadtebene besteht kein Potenzial in Bezug auf Moore, daher beschränken wir uns im Folgenden auf Flächen im Kanton Zürich. und Im Fokus stehen hier die langfristige Senkenwirkung gut erhaltener Moore sowie die allfällige langfristige Senkenwirkung bei einer wissenschaftlich begleiteten Regenerierung (z.B. als Moorergänzungsflächen gemäss dem Naturschutzgesamtkonzept) wobei landwirtschaftliche Flächen wiedervernässt und Wachstum von Torfmoos (oder zumindest Riedvegetation) angestrebt wird (wobei die landwirtschaftliche Nutzung stark extensiviert würde). Der Dekarbonisierungsbericht (Füssler et al. 2020) erörtert parallel hierzu das allfällige Emissions-Minderungspotenzial von Massnahmen, um den Kohlenstoffabbau zu mindern.

3.1. Wissensstand

Intakte Hochmoore wirken als Senke¹⁴, seit der Industrialisierung sind im Kanton Zürich jedoch rund 90% aller Moore zugunsten von Siedlungs- und entwässerten Landwirtschaftsflächen sowie Torfabbau verloren gegangen (Greene, 2015b). Sind Moore einmal drainiert, oder steigenden Temperaturen oder Wasserspiegeln ausgesetzt, verlieren sie ihre langfristige Senkenwirkung und setzen grosse Mengen an CO₂ und anderen Treibhausgasen wie Methan und Lachgas frei.

Massnahmen zur Erhaltung von Hochmooren könnten weltweit Emissionsminderungen in Höhe von bis zu 4.6 GtCO₂e bewirken (Griscom et al., 2017) und ihre Senkenfunktion erhalten.

¹⁴ Das Torfwachstum eines intakten Hochmoores hat eine Senkenwirkung in der Grössenordnung von jährlich 1 tCO₂/ha (IPCC, 2014a, Hurkuck, 2016).

Globale Schätzungen der Potenziale wie auch der damit einhergehenden – regional stark unterschiedlichen – Kosten sind mit grossen Unsicherheiten behaftet.¹⁵ Auch Schätzungen für die Schweiz lassen bisher keine konkreten Voraussagen für senkenspezifische Kosten zu, was unter anderem auch auf die grossen wissenschaftlichen Unsicherheiten bezüglich der Reaktion verschiedener Bodenökosysteme auf Veränderungen im Wasserstand zurückzuführen ist¹⁶. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor im Kontext der Senkenwirkung von Mooren bzw. Moorergänzungsflächen ist die Frage der Permanenz, da wie beim Forstsektor die Gefahr besteht, dass Massnahmen reversibel sind und sogar zusätzliche Emissionen generieren können. Die Kohlenstoffspeicherungswirkung von wiedervernässten organischen Böden kann in gewissen Fällen kurzfristig wesentlich geringer sein als die dabei entstehenden Methan- oder Lachgas-Emissionen. Auf lange Sicht (viele Jahrzehnte) kann die Wirkung als Kohlenstoffsенке jedoch diejenige der Methanquelle übersteigen (Frolking und Rou-Let, 2007; Petrescu et al., 2015). Andererseits kann mit der Wiedervernässung der weitere Abbau des Bodenkohlenstoffpools bereits kurzfristig stark reduziert werden.

Vor dem Hintergrund eines Klimazieles für 2030, 2040 oder 2050 scheint es also essentiell, dass Massnahmen zum Moorschutz sowie zur allfälligen Wiedervernässung darauf ausgerichtet sind, Emissionen zu vermeiden, wobei eine langfristige Senkenwirkung – wo möglich – anzustreben ist. Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass allfällige kurzfristige Emissionen von Lachgas oder Methan sowie der langfristige Aufbau von organischer Substanz im Boden stark vom Wasserstand, der Geschwindigkeit der Veränderung, dem Aufbau des Bodens sowie der Vegetation abhängig sind. Eine schrittweise Vernässung bis 10 cm unter Bodenoberfläche scheint in den meisten Fällen zum Vermeiden von Emissionen sowie zum Erhalten der Senkenfunktion sinnvoll (s. auch Dekarbonisierungsbericht (Füssler et al. 2020)).

3.2. Ist-Zustand für den Kanton Zürich

Im Kanton Zürich sind ca. 96% der Moore entwässert, sodass aktuell noch eine Fläche von ca. 50 ha an intakten Hochmooren existiert. Diese drainierten, landwirtschaftlich meist intensiv genutzten Böden wirken somit als Quelle von Treibhausgasen (Greene, 2015a)¹⁷. In den vergangenen 10 Jahren hat der Kanton 28 ha an drainierten Flächen wiedervernässt, welche nun soweit da auch Torfzuwachs stattfindet als Senke agieren wobei allfällige Methan oder Lachgasemissionen

¹⁵ Ein Beispiel aus den USA zeigt die mögliche Spannweite solcher Schätzungen, welche sich auf 420 bis 15.000 USD/ha belaufen (Hansen et al., 2015).

¹⁶ Nach Ismail et al. (2009) würde die Renaturierung aller drainierter Schweizer Hochmoore einmalig 100 bis 150 Mio. CHF kosten sowie jährliche Unterhaltskosten von 3,5 bis 4,5 Mio CHF erfordern.

¹⁷ Im Kanton Zürich gibt es 30 Hochmoorobjekte mit einer Gesamtfläche von rund 50 ha und rund 1.800 ha Riedwiesen (hauptsächlich in Form von Flachmooren) (Marti et al., 2009; ALN, 2016). Wiedervernässte Flach und Hochmoore haben eine wesentlich verbesserte THG-Bilanz, wobei eine Netto-Senkenleistung nur in wenigen Fällen erreicht wird (zwischen -1 und 7 tCO₂/ha; Paul und Schellenberger, 2015). Insgesamt setzen die kantonalen Moorflächen jährlich rund 20.000 tCO₂ frei (Greene, 2015a, 2015b).

für eine Bilanz zusätzlich zu berücksichtigen sind. Der Massnahmenplan (AWEL, 2018a) und das Naturschutz-Gesamtkonzept (NSGK) legen zudem konkrete Zielwerte fest: Diese sehen vor, ausserhalb der heute bestehenden inventarisierten Flach- und Hochmoore bis 2025 150 ha als Moore wiederherzustellen sowie insgesamt 1300 ha Feuchtgebietsergänzungsflächen auf ehemals drainierten Böden zu sichern, die sich aus 1000 ha Regenerationsflächen mit Moor-Zielvegetation sowie 300 ha Extensivwiesen zusammensetzen (ALN, 2016). Inwieweit diese Flächen in wenigen Jahrzehnten eine Senkenwirkung haben könnten, ist unklar; eine solche besitzen vor allem die intakten Hochmoorflächen (in der jährlichen Grössenordnung von 1 tCO₂/ha).

Nur ein geringer Teil der (ehemaligen) Moorflächen sowie ein Teil der erhaltenen Hochmoorflächen ist Eigentum der öffentlichen Hand, befinden sich jedoch unter einer eigentümergebundenen, kantonalen Schutzverordnung und werden damit durch den Kanton erhalten und gefördert (ALN, 2016).

Für eine allfällige langfristige Senkenwirkung stellt sich letztlich die Frage, welche Flächen an organischen Böden sich – über den Schutz der noch intakten Moorflächen hinaus – dafür eignen könnten, wieder vernässt und zu Hochmooren umgewandelt zu werden, wobei die entsprechende Zielvegetation sich wohl nur durch aktive Einflussnahme wieder etablieren könnte. Aktualisierte Daten zu den Flächen mit organischen Böden im Kanton werden aktuell bei der Fachstelle Bodenschutz aufgearbeitet (die letztverfügbaren Daten stammen von 1990). Auf Basis einer solchen aktualisierten Datenlage liesse sich das allfällige langfristige Verminderungs- und Senkenpotenzial durch Wiedervernässung von Böden abschätzen. Viel stärker ins Gewicht hinsichtlich der Treibhausgas-Bilanz bzw. einem ambitionierten Netto-Null Ziel fallen die durch die Massnahmen Extensivierung und/oder Wiedervernässung auch kurzfristig zu erreichenden Emissionsverminderungen (vgl. Bericht Dekarbonisierung Füssler et al. 2020). Werden solche Massnahmen unterlassen, um den noch im Boden gespeicherten Kohlenstoffvorrat organischer Böden zu erhalten, werden auf den drainierten, landwirtschaftlich genutzten Flächen kontinuierlich sehr grosse jährliche Emissionen verursacht. Eine längerfristige zusätzliche Senkenwirkung von regenerierten Feuchtgebieten kann dabei – wenn überhaupt – nur einen allfälligen Zusatznutzen hinsichtlich der Zielerreichung bringen. Nach dem Wiederanstieg des Wasserspiegels kann es beispielsweise einige Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis sich die Vegetation auf den veränderten Wasserspiegel eingestellt hat, wogegen die Lachgas- und Methan-Emissionen frühzeitig ansteigen und wieder sinken. Ebenfalls könnte ein allfälliger Oberbodenabtrag stattfinden, dessen CO₂-Emissionswirkung aktuell von der Fachstelle Naturschutz anhand konkreter Beispiele abgeschätzt wird.

3.3. Kosten und Potenziale

Das technische Potenzial der Senken bei bestehenden Hochmooren ergibt sich aus der durchschnittlichen Wachstumsrate intakter Hochmoore und der bestehenden Moorflächen. Das theoretische langfristige Potenzial durch Wiedervernässung drainierter organischer Böden ausserhalb von Schutzgebieten wäre durch die ggf. identifizierten Flächen mit einer Hochmoor-Zielvegetation sowie der Wachstumsrate nach einer initialen Umstellungsphase (welche möglicherweise mehrere Jahrzehnte dauern könnte) abzuschätzen. Da eine wesentliche Senkenwirkung mit grosser Wahrscheinlichkeit ausserhalb des Zeitfensters für ein Netto-Null-Ziel 2030 bis 2050 liegen würde, wird hier vorerst kein technisches Potenzial identifiziert. Künftige Studien könnten jedoch ein langfristiges Senkenpotenzial für die Wiedervernässung identifizieren, wobei jedoch kurzfristige Emissionen entsprechend berücksichtigt werden müssten.

Die optimistische Schätzung der Senkenwirkung lehnt sich an die Zielvorgaben des NSGK an und geht von der Erreichung der 2025-Ziele und einer Ausweitung der Schutzmassnahmen auf den verbleibenden Hochmoorflächen bis 2050 aus. Das pessimistische Szenario wiederum geht von keinem weiteren Ausbau und Schutz der Moorflächen aus und bleibt bei den aktuell noch erhaltenen Hochmoorflächen von ca. 50 ha.

Da Massnahmen zum Schutz und Erhalt der Hochmoore nicht primär auf deren Senkenfunktion ausgerichtet sind,¹⁸ lassen sich keine damit verbundenen Kosten (je Tonne CO₂-Entfernung) angeben. Entsprechende Kostenschätzungen für die Wiederherstellung von Mooren werden von Gubler und Braunschweiger (2017) auf 78.000 CHF/ha Moor geschätzt, was etwa einem CO₂-Speicherungspreis von 780 CHF/tCO₂ entspräche, wenn von einer Lebensdauer der Senke von 100 Jahren ausgegangen und nicht diskontiert wird).¹⁹ Auch der CO₂-Kompensationsansatz, der von der WSL entwickelt wurde (Max.Moor), ignoriert die Senkenwirkung aufgrund zu grosser Unsicherheiten.²⁰

¹⁸ Indirekt spielt die Senkenfunktion dennoch eine Rolle, da bei Erfolgskontrollen neben dem Pegel auch die Torfmoosfläche berücksichtigt wird.

¹⁹ Hiervon fallen rund 60% der Kosten für die Arbeiten vor Ort, 35% für Planung und baubegleitende Massnahmen sowie die restlichen 5% für Öffentlichkeitsarbeit und Nachkontrolle an.

²⁰ Mehr Hintergründe zum Kompensationsstandard Max.Moor gibt es auf der Seite der WSL (o. D.).

Tabelle 3: Schätzungen* zu den Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernungsansätze des Moorschutzes und der Wiedervernässung im Kanton

Massnahme			Schutz und Erhalten von bestehenden Hochmooren			Wiedervernässung organischer Böden***		
Technisches Potenzial			50 tCO ₂ /a			Unklar: Flächen mit organischen Böden, welche sich langfristig für eine Renaturierung zu Hochmoor-Zielvegetation eignen; Jahrzehnte bis Jahrhunderte-lange Dauer des Aufbaus organischer Böden		
Limitierende Faktoren			Verbleibende erhaltene Hochmoorflächen			Landwirtschaftliche Produktion, Bauten und Infrastrukturflächen; wirtschaftliches Interesse (Landw. Produktion) Planungsdauer für Renaturierungsprojekte, Verlust von Fruchtfolgeflächen (FFF)-Potentialflächen für die Kompensation von FFF durch Auftrag von mineralischem Bodenaushub		
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO₂ / a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	0	0	0
		Kanton	0.05	0.05	0.05	0	0	0
	optimistisch	Stadt	0	0	0	0	0	0
		Kanton	0.05	0.05	0.05	0	**	**

* Keine senken-spezifischen Kosten identifizierbar.

** Weitere Senkenpotenziale von der Flächeneignung für eine allfällige weitere Wiedervernässung organischer Böden mit Hochmoor-Zielvegetation abhängig (laufende Überarbeitung durch das Amt für Naturschutz).

*** Sehr grosses Verminderungspotenzial (vgl. Dekarbonisierungsbericht - Füssler et al. 2020); das Senkenpotenzial ist demgegenüber jedoch vernachlässigbar und mit grossen Unsicherheiten behaftet.

3.4. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Obschon die Senkenpotenziale von Mooren im Kanton Zürich überschaubar sind, könnten diese die durchaus substantiellen Emissionsminderungspotenziale ergänzen. Um die damit verbundenen Wirkungen auf Methan- und Lachgasemissionen sowie die CO₂-Emissionen und -Senken besser abschätzen zu können, wäre es jedoch notwendig, ein besseres Verständnis darüber zu gewinnen, auf welchen Flächen entsprechende Massnahmen sinnvoll sein könnten. Dazu sollten die organischen Böden nachkartiert werden und es sollte insbesondere besser aufgearbeitet werden, unter welchen Bedingungen (Wasserstand, Vegetation, Geschwindigkeit der Wiedervernässung und Bodenaufbau) eine Vernässung mit einem Minimum an kurzfristigen Emissionen und einem Maximum langfristiger CO₂-Entfernung und Emissionsminderung verbunden wäre.

Dabei ist es von zentraler Bedeutung, besser zu verstehen, ob und wie sichergestellt werden kann, dass sich dabei auch die Vegetation anpassen und letztlich zu einer intakten Hochmoor-Zielvegetation entwickeln kann.

Die im Massnahmenplan und NSGK festgelegten Zielwerte und identifizierten Handlungsoptionen sollten grundsätzlich umgesetzt werden. Massnahmen im Bereich des Moorschutzes sollten dabei im Kontext von Netto-Null-Klimazielen wissenschaftlich begleitet werden, um ein besseres Verständnis über deren kurz-, mittel- und langfristige CO₂-Bilanz zu gewinnen. Dabei sollten die langfristigen Vorteile der Senkenfunktion herausgestellt werden, da intakte Moore über Jahrzehnte und Jahrhunderte CO₂ binden und somit lange über 2050 hinaus einen Beitrag zur Stabilisierung des Klimas leisten können.

Das Amt für Landschaft und Natur, bzw. die Fachstelle Naturschutz könnten eine wichtige Rolle in der Identifizierung von prioritären Flächen zur wissenschaftlich begleiteten Wiedervernässung spielen, wobei die verschiedenen Ziele des Naturschutzes, der Wirtschaftlichkeit und des kurz- und langfristigen Klimaschutzes berücksichtigt werden sollten.

4. Landwirtschaftliche Böden

Wir betrachten im Bereich der landwirtschaftlichen Böden ausschliesslich solche Ansätze als mögliche Senken, bei denen die hauptsächliche Nutzung des Bodens weiterhin in der Landwirtschaft verbleibt (eine komplette Wiederherstellung früherer Moorflächen oder eine vollständige Verwaldung ist hier ausgenommen). Der Ansatz der beschleunigten Verwitterung wird separat behandelt. Der landwirtschaftlichen Produktion von Biomasse zur Stromproduktion wird im Kanton Zürich kein Potenzial zugeschrieben, da dieses in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stünde und daher keine sinnvolle Senkenmassnahme darstellen würde²¹.

Nachfolgend berücksichtigte Massnahmen bei landwirtschaftlichen Böden umfassen:

- Aufbau des Humusgehaltes (verschiedene Ansätze möglich)
- Einbringen von Pflanzenkohle

4.1. Wissensstand

Massnahmen zur Steigerung des Bodenkohlenstoffgehaltes in der Landwirtschaft sind mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet, was deren Effektivität, Nebeneffekte und Permanenz angeht.

Verschiedene Bodenbearbeitungspraktiken wie das reduzierte Pflügen/Direktsaat («no-till») oder das einmalige tiefe Umwenden der Bodenschichten durch den Einsatz eines Tiefpfluges

²¹ Der Anbau von energetischer Biomasse auf Landwirtschaftsflächen in der Schweiz würde zu einer Verschiebung der Nahrungsmittelproduktion ins Ausland führen, womit weitere THG Emissionen verbunden wären.

kommen in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffung, den klimatischen Bedingungen und der angebauten Kulturen zu unterschiedlichen Ergebnissen.²² Der Ansatz der Direktsaat (pfluglose Landwirtschaft) wurde anfänglich als vielversprechend betrachtet, jedoch haben sich in den letzten Jahren Studien gemehrt, welche auf vielfältige Nachteile hinweisen (Einsatz von Totalherbiziden) und auf eine eingeschränkte Wirksamkeit aufgrund des Abbaus von Kohlenstoff in tieferen Schichten hindeuten. Der Einsatz von Tiefpflügen zum einmaligen Umwenden der Bodenschichten (ggf. alle 10-15 Jahre wiederholt) könnte prinzipiell zu einem mittelfristigen Neuaufbau von Humus führen, jedoch gibt es kaum Langzeitstudien zur langfristigen Effektivität (und kurzfristig sind starke Ernteeinbussen zu erwarten). Bei dem verstärkten Zurücklassen von Pflanzenrückständen sowie der Nutzung von Hofdünger sind die Vorteile bzgl. Bodenkohlenstoff relativ gut verstanden, jedoch stehen diesen auch gewisse Produktivitätsverluste gegenüber, da die Pflanzenrückstände dementsprechend anderswo, z.B. als Tierfutter, nicht genutzt werden können.

Bei der Pflanzenkohle besteht ein etwas besseres Verständnis, was die Kohlenstoffspeicherung und verschiedene positive Nebeneffekte angeht. Es gibt jedoch auch hier noch relativ wenige praktische Erfahrung im westeuropäischen Kontext, so dass die nachfolgend vorgestellten technischen Potenziale mit Unsicherheiten behaftet sind und vorerst nur Pilotversuche unter wissenschaftlicher Begleitung sinnvoll erscheinen.²³ Eine Unsicherheit besteht darin, dass die Qualität der Pflanzenkohle sicherzustellen ist und die Nährstoffverfügbarkeit im Boden verändert werden könnte. Auf Grund dieser Unsicherheiten ist die Ausbringung von Pflanzenkohle umstritten. Es sind zunächst umfangreiche (auch rechtliche) Abklärungen notwendig, bevor über die Ausbringung von Pflanzenkohle als Massnahme entschieden werden kann.

Kasten 1: Agroforstwirtschaft

Agroforstwirtschaft, also eine Kombination aus forst- und landwirtschaftlicher Bewirtschaftung, könnte grundsätzlich ebenfalls zu einer Entfernung und Speicherung von CO₂ führen, wobei auch weitere positive Nebeneffekte für den Wasserkreislauf, die Bodenstabilität sowie die Biodiversität entstehen können. Agroforstwirtschaft lässt sich jedoch nur für bestimmte Kulturkombinationen umsetzen und in vielen Bereichen wohl nur im Fall einer Extensivierung

²² Der aktuelle Wissensstand der internationalen Literatur geht davon aus, dass durch Massnahmen zur Erhaltung bzw. Steigerung des Humusgehaltes jährlich rund 0,5 bis 11 GtCO₂ an Emissionen verhindert bzw. CO₂ entfernt werden könnten (heruntergebrochen auf den schweizerischen Massstab würde dies 3,6 Mt CO₂/a entsprechen). Diese Zahlen basieren weitgehend auf globalen Mittelwerten und wenigen Datenpunkten. Da diese Praktiken bislang zumeist nicht grosskaliert getestet wurden, klafft die Spannweite der erwarteten Aufwendungen zwischen -45 und 100 USD/tCO₂ (für die Schweiz liegen Kostenschätzungen zwischen 0 und 80 CHF/tCO₂) (Fuss et al., 2018; Akademien der Wissenschaften, 2018; Beuttler et al., 2019).

²³ Das Potenzial des Einbringens von Pflanzenkohle wird in der internationalen Literatur mit enormen Diskrepanzen auf global 1 bis 35 Gt CO₂/a geschätzt. Der IPCC Bericht zur Landnutzung (2019) nennt eine geringere Spannweite im Jahr 2050 von 0,03-4,9 GtCO₂/a, wobei der maximale Wert unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten auf 1-2 GtCO₂e sinkt. Schätzungen von Kosten bewegen sich in der grossen Spannweite von 10 bis 345 USD//t CO₂ (für die Schweiz werden Kosten auf zwischen 10 und 135 CHF/tCO₂ geschätzt) (Fuss et al., 2018; Akademien der Wissenschaften, 2018; Beuttler et al., 2019).

der Produktion. Eine Umstellung gewisser Flächen auf Agroforstwirtschaft könnte möglicherweise im Kanton Zürich praktiziert werden, die dabei mögliche Senkenwirkung ist stark von den jeweiligen Kulturen abhängig (300kg – 26 tCO₂/ha jährlich; Kay et al., 2019), weshalb es für eine belastbare Schätzung des Potentials solcher Massnahmen weiterer Arbeiten bedürfte. Weitere angewandte Forschung könnte hier aufzeigen wie alternative landwirtschaftliche Produktionsweisen CO₂ entfernen und Resilienz gegenüber Klimaschäden steigern könnte.

Grundsätzlich gilt für den Erfolg aller Massnahmen zur Steigerung der Kohlenstoffspeicherung von Böden, dass diese Massnahmen kontinuierlich weitergeführt werden, da der CO₂-Speichereffekt ansonsten durch die spätere Bodennutzung wieder aufgehoben würde (mangelnde Permanenz). Ausserdem benötigt die Kohlenstoffanreicherung in Böden sehr lange, 10 bis 100 Jahren (Fuss et al., 2018).

4.2. Ist-Zustand für die Stadt Zürich

Die Stadt Zürich umfasst 810 ha landwirtschaftlich genutztes Land, welches schon heute weitgehend extensiv genutzt wird. Die nachfolgende Beschreibung bezgl. Senkenpotentialen im Kanton gilt qualitativ grundsätzlich auch für die Stadtzürcher Flächen, wobei aber naturgemäss das gesamte Potential eine wesentlich kleinere Grössenordnung erreicht (s. Tabelle 4).

4.3. Ist-Zustand für den Kanton Zürich

Der Kanton Zürich umfasst rund 76.000 ha landwirtschaftliche Böden (44% der gesamten Kantonsfläche), mit einer leichten Abnahme im Laufe der vergangenen Jahrzehnte (Etterlin und Gsponer, 2015). Landwirtschaftliche Böden wirken insgesamt bis anhin als Quelle von THG²⁴ (Paul und Schellenberger, 2015), weshalb bislang die Minderung der Emissionen im Fokus standen. Dennoch gibt es einige Ansätze der CO₂-Entfernung durch Steigerung des Bodenkohlenstoffgehaltes, welche prinzipiell auch im Kanton Zürich zur Anwendung kommen könnten. Zwar gibt die Bodenkartierung Hinweise auf ungefähre Humusanteile, und es besteht das allgemeine Verständnis, dass diese in vielen Fällen gesteigert werden könnten, es lassen sich jedoch kaum Durchschnittswerte für verschiedene Bodentypen und Anbaumethoden ableiten. In Bezug auf den Einsatz von Pflanzenkohle fehlt auch im Kanton Zürich bisher weitgehend die praktische Erfahrung und für eine exakte Quantifizierung des Potentials fehlen spezifische Werte zu Bodenkohlenstoffgehalten.

²⁴ In der Schweiz betragen die jährlichen Emissionen aus organischen Böden ca. 0,74 Mio. tCO₂e (Leifeld et al., 2019).

Trotz dieser Einschränkungen werden verschiedene Möglichkeiten zum Humusaufbau wie auch zum Einsatz von Pflanzenkohle in angewandten Forschungsprojekten untersucht. Das Verhältnis der organischen Substanz (OS) zu Ton ist eine Kerngrösse bezüglich dem Kohlenstoffgehalt eines Bodens. Ein Mindestwert von 12% ist auf den meisten Böden anzustreben (Flisch et al., 2009; Richner und Sinai, 2017), womit auf vielen Flächen ein gewisses Potenzial bestünde. Auf einzelnen Flächen könnten auch ambitioniertere Zielwerte von 17% bis 24% sinnvoll sein (Johannes et al., 2018). Eine Erhöhung des Humusgehaltes über den standortspezifisch optimalen Humusgehalt kann jedoch auch wiederum zu zusätzlichen Emissionen von CO₂, Lachgas und Methan führen, was zu vermeiden ist²⁵. Beim Zuführen organischer Substanzen (Pflanzenreste oder Hofdünger) verbleibt wohl nur ein geringer Anteil von ca. 10% im Boden, während der Rest wieder als CO₂ in die Atmosphäre entschwindet. Das bedeutet, dass einer Steigerung um 0,1% wohl über 100 t Pflanzentrockenmasse je ha gegenübersteht, was verdeutlicht, dass ein solcher Aufbau nur über viele Jahre bis Jahrzehnte hinweg stattfinden kann und kaum ohne Produktionseinbussen möglich ist.

Um die Auswirkungen von erhöhtem Humusgehalt sowie geeignete landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken genauer zu verstehen, hat der Kanton Solothurn das Ressourcenprogramm Humus ins Leben gerufen (Kanton Solothurn, 2020). Das Ressourcenprojekt AgroCO₂ncept versucht in Zusammenarbeit mit Landwirtinnen und Landwirten, Unternehmerinnen und Unternehmen sowie Forschenden im Flaachtal konkrete Projekte zur Steigerung der Bodenkohlenstoffspeicherung, Ausbringen von Pflanzenkohle und Agroforstwirtschaft zu realisieren (AgroCO₂ncept, o. D.). Inwieweit sich aus diesen Projekten in den nächsten Jahren verallgemeinerbare Empfehlungen ableiten lassen, ist noch nicht absehbar.

4.4. Kosten und Potenziale

Mit der heute verfügbaren Information lässt sich selbst für das technische Potenzial nur eine grobe Projektion der Grössenordnung allfälliger Senken in der Landwirtschaft machen. Ansätze in diesem Bereich bedürfen weiterer wissenschaftlicher Begleitung und können vorerst ausschliesslich im Rahmen von Pilotversuchen getestet werden. Der Bedarf an langfristiger Forschung zur landwirtschaftlichen CO₂-Entfernung sowie deren Pilotierung und Demonstration ist erheblich, wonach ein substantielles Senkenpotenzial frühestens 5 bis 15 Jahre nach Start systematischerer Forschungsanstrengungen realisierbar werden könnte.

²⁵ Wie weit die Böden im Kanton Zürich noch das als «befriedigend» erachtete OS-Ton-Verhältnis von 12% einhalten, ist unklar; hierzu fehlen aktuelle Daten und es ist anzunehmen, dass der OS-Gehalt seit der letzten Kartierung 1990 wohl eher abgenommen hat. Sicher ist, dass wohl nur wenige Flächen den oberen Wert auf der Skala (17%) oder gar die in der Praxis möglichen 24% erreichen (Johannes et al., 2018).

Der Aufbau von Humus (über welche Massnahme auch immer) dauert Jahre bis Jahrzehnte und erfordert kontinuierliche humusaufbauende Massnahmen, deren Erfolg fortlaufend zu überwachen ist. Humus verschiedener Bodentypen ist nicht identisch, da er in einer komplexen Verbindung mit Bodenökosystemen besteht, welche unterschiedlich auf Veränderung reagieren. Sollte sich herausstellen, dass auf 30% der landwirtschaftlichen Böden eine jährliche Steigerungsrate der organischen Bodensubstanz um 4% auf durchschnittlich 10% bis 17% OS-Ton Gehalt sinnvoll und möglich wäre, würde dies einem Senkenpotenzial in der Grössenordnung von 75.000 tCO₂/a entsprechen, das jedoch nach ca. 20 Jahren erschöpft wäre²⁶. Die erhaltenden Massnahmen müssten danach jedoch fortgesetzt werden, um den Boden-CO₂-Speicher aufrecht zu erhalten und spätere CO₂-Emissionen zu verhindern. Diese Zahl stellt jedoch keine verlässliche Schätzung eines Potenzials dar, da zum heutigen Zeitpunkt nicht feststeht, ob die dazu notwendigen Massnahmen auch nur theoretisch möglich und sinnvoll wären²⁷. Ausserdem ist es möglich, dass Böden durch die Folgen der Klimaerwärmung zusätzlich zu einem Verlust an Humus tendieren könnten, was auf zusätzlichen Bedarf an Schutzmassnahmen hindeuten würde (OcCC/ProClim, 2007).

Der Einsatz von Pflanzenkohle könnte weitgehend unabhängig von humusaufbauenden Praktiken umgesetzt werden, dieser steht also nicht in Flächen- oder Ressourcenkonkurrenz. Eine Voraussetzung ist, dass die Qualitätssicherung gegeben ist, sodass keine Schadstoffe in den Boden oder ggf. ins Tierfutter gelangen (letzteres bedingt, dass Produktionsstandards eingehalten werden²⁸). Das technische Potenzial für die Produktion der Pflanzenkohle²⁹ scheint, gemessen am Anwendungspotenzial im Kanton Zürich, nicht limitierend, zumal auch im Ausland produzierte Pflanzenkohle eingesetzt werden könnte. Unsicherheiten über die Grösse des Potenzials bestehen insbesondere darin, wie gross die einzubringende Menge je Hektar Land sein könnte, ob diese direkt oder als Zusatz in Kompost oder über die Nahrungsaufnahme von Nutztieren und dem Ausbringen von Hofdünger eingebracht werden sollte und wie gross die Kohlenstoffrückhaltungswirkung ist. Eine jährliche durchschnittliche Anwendung in der Grössenordnung von 0,5 t/ha scheint jedoch technisch möglich und könnte mit vielen positiven Produktionsnebenwirkungen verbunden sein, welche die Anwendung wirtschaftlich attraktiv gestalten könnten. Bei einer Anwendung auf 40% der Flächen entspräche dies einem Potenzial von 55.000 tCO₂/a für den

²⁶ Vergleiche mit *4 per 1000 Initiative*, die eine CO₂-Senkenwirkung in der Grössenordnung von rund 0,4% des bisherigen OC Gehaltes postuliert; Schätzung der Kohlenstoffspeicherung in land- und forstwirtschaftlichen Böden in Form von Humus des Kantons Zürich rund 17 Millionen tC.

²⁷ Für eine zuverlässige Schätzung müssten zusätzliche Daten erhoben werden zum Kohlenstoffgehalt verschiedener Böden und eine auf jeden Boden angepasste detaillierte Bestimmung sinnvoller Steigerungsmassnahmen anhand bspw. des *Agroscope Humus Balance* vorgenommen werden (siehe www.humusbilanz.ch).

²⁸ Standards wie das *European Biochar Certificate (EBC)* können helfen, die Qualität von Pflanzenkohle besser abschätzen zu können.

²⁹ Siehe auch Beuttler et al. (2019) bezüglich Annahmen zu schweizerischen Produktionspotenzialen.

direkten Speichereffekt der eingebrachten Pflanzenkohle. Darüber hinaus ist ein sekundärer zusätzlicher Aufbau von Bodenkohlenstoff in der Grössenordnung von bis zu 275.000 tCO₂/a möglich³⁰, wobei hier ohne Langzeitstudie eine grosse Unsicherheit besteht. Das hiermit definierte kumulative technische CO₂-Entfernungspotenzial der Pflanzenkohle läge im Kanton Zürich also bei 55.000-330.000 tCO₂/a über einen Zeithorizont von mehreren Dekaden, dabei entspricht dasjenige der Stadt Zürich aufgrund der verfügbaren Landwirtschaftsflächen ca. 1% des kantonalen Potentials (d.h. 550-3.300 tCO₂)³¹.

In der Schätzung des realen Potenzials ist zu berücksichtigen, dass bei konsequentem Verfolgen von Klimazielen unter anderem auch durch den Einsatz von Biomasse irgendwann Trade-offs aufgrund beschränkter Verfügbarkeit zwischen den einzelnen NETs entstehen können. Allerdings können ebenso auch Synergien entstehen, da die Herstellung der Pflanzenkohle (durch Pyrolyse) auch zur Strom- oder Wärme Gewinnung genutzt werden könnte, wobei letztlich auch CCS nachgeschaltet werden kann. Die Adoption neuer landwirtschaftlicher Praktiken ist immer auch mit Mehrkosten verbunden und erfordert eine grundlegende Bereitschaft zur Veränderung seitens der Bauern. Dies kann, wie auch die lange Zeitdauer, welche für zusätzliche angewandte Forschung im Bereich der Böden notwendig ist, das Potenzial mindern.

Als optimistisches Szenario nehmen wir an, dass die Qualität sichergestellt werden kann und der Einsatz von Pflanzenkohle sich aufgrund vieler Anwendungsvorteile rasch erhöht. Das pessimistische Szenario geht davon aus, dass Qualitätsprobleme weiterbestehen, und die Landwirte Pflanzenkohle nur in einzelnen Fällen anwenden.

Das pessimistische Szenario geht vom oberen Wert der Kostenschätzungen aus (Beuttler et al., 2019), während das optimistische Szenario sich am unteren Wert orientiert; aufgrund diverser produktionsfördernder Eigenschaften und verhältnismässig geringen Einsatzkosten könnte die Massnahmen teilweise wirtschaftlich selbsttragend werden, allerdings würden wohl gewisse Transaktionskosten für Monitoring und Berichterstattung verbleiben.

³⁰ Zudem könnte der erhöhte Kohlenstoffgehalt Emissionen von Methan und Lachgas mindern, aber diese Wirkung ist auch bisher nur ungenügend dokumentiert (Smith, 2016).

³¹ Die Zugabe von Pflanzenkohle hat wohl eine längere Saturierungsdauer als der Humusaufbau, diese ist jedoch noch nicht abschliessend geklärt.

Tabelle 4: Schätzungen zu den Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernungsansätze in der Landwirtschaft (Werte für den Kanton inkl. Stadt)

Massnahme			Humusaufbau			Pflanzenkohle		
Technisches Potenzial			Kein heute bestätigtes Potenzial; Forschung und Pilotprojekte könnten ein Potenzial in der Grössenordnung von 75.000 tCO ₂ über 20 Jahre feststellen			55.000-330.000 tCO ₂ über 20-50 Jahre		
Limitierende Faktoren			Trade-off mit der Wirtschaftlichkeit; Aufbau dauert Jahrzehnte; reversibel bei veränderter Bearbeitung			Graduelle Aufskalierung über Pilotversuche		
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO₂ / a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	0.01	0.17	0.25
		Kanton	0	0	0	1.5	17	25
	optimistisch	Stadt	0.03	0.3	0.6	0.09	0.12	0.136
		Kanton	3	30	60	8.5	120	136
Kosten (CHF / tCO₂)	pessimistisch		20	10	0	30	20	10
	optimistisch		20	10	0	30	20	10

4.5. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Es bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der Potentiale, die sich im Bereich der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung tatsächlich mobilisieren lassen könnten. Bei einzelnen Ansätze ist selbst die Machbarkeit an sich noch unklar Daher ist hier ein spezielles Augenmerk auf die Forschung zu richten: Es lassen sich für den Bereich der landwirtschaftlichen Bodensenken drei Kategorien von Massnahmenoptionen für die öffentliche Hand (Kanton und Stadt in Zusammenarbeit) festmachen: A) angewandte Forschung, B) grössere Pilotversuche und C) die Umsetzung. Die verschiedenen Ansätze teilen sich entsprechend dem jeweils dazu schon vorhandenen Wissensstand in die drei Kategorien, wobei sich diese auch überlappen und gegenseitig ergänzen können:

A) Angewandte Forschung und Koordination

Die öffentliche Hand kann die angewandte Forschung in den relevanten landwirtschaftlichen Bereichen weiter fördern. Einerseits könnte eine Übersichtsstudie zum kantonalen Senkenpotenzial verschiedener Bodentypen Aufschluss darüber geben, wo die grössten Potenziale liegen und wie weit sich diese synergetisch mit landwirtschaftlichen Zielen vereinbaren lassen. Andererseits scheinen weitere Langzeitstudien bzw. Fortsetzungen bisheriger Arbeiten (z.B. AgroCO₂ncept)

notwendig, um die Senkenpotenziale (sowie Aufwände und Nebeneffekte) verschiedener bodenbearbeitender Praktiken wie dem reduzierten Pflügen, dem Einsatz von Tiefpflug oder Anwendungen von Pflanzenkohle zu prüfen. Stadt und Kanton können hier auf bestehende Kooperationen aufbauen und die genannten Ansätze in systematischer Art und Weise in inter- und transdisziplinären Forschungsprojekten unter anwendungsnahen Bedingungen testen. Erste Ergebnisse sollten schon nach wenigen Jahren in die politische Planung zurückfliessen.

Da die Anreize in der schweizerischen Landwirtschaft stark von Direktzahlungen des Bundes geprägt sind, sollten allfällige Politikinstrumente des Kantons frühzeitig mit dem Bund abgestimmt werden. Es wäre auch denkbar, dass Erfahrungen aus dem Kanton dem Bund als Lernobjekt dienen könnten, um später schweizweite Anreize zur Anreicherung des Bodenkohlenstoffgehaltes einzuführen. Allenfalls könnte der Kanton im Rahmen von Pilotversuchen auch spezifische finanzielle Anreize einführen, die an konkrete Zielwerte für das Bodenmanagement gekoppelt sind. Auch in anderen Bereichen besteht ein Koordinationsbedarf zwischen amtlichen Stellen des Bundes und des Kantons, so zum Beispiel in Bezug auf eine konsistente GPS-gestützte feingliedrige Messmethodik für Bodenkohlenstoffgehalte über lange Zeithorizonte.

B) Pilotversuche

Wo heute schon zufriedenstellende Forschungsergebnisse vorliegen, bzw. künftig solche bekannt werden (möglicherweise im Fall der Pflanzenkohle oder agroforstwirtschaftlicher Praktiken), könnte die Stadt/der Kanton Pilotprojekte fördern. Diese sollten möglichst realitätsnah gestaltet sein und Akteure aus der privatwirtschaftlichen Landwirtschaft einbinden, so dass auch eine Evaluation möglicher finanzieller und regulatorischer Anreizsysteme möglich wird. Solche regionalen und wissenschaftlich begleiteten Pilotversuche könnten darüber hinaus Sicherheit in Bezug auf die Skalierbarkeit und weitere ökologische Nebeneffekte schaffen. Ausserdem könnten verschiedene Instrumente auf deren Effektivität getestet werden (bspw. resultatbasierte Direktzahlungen für demonstrierte Kohlenstoffsteigerung in Höhe der allfälligen Mehraufwendungen oder Ertragsausfälle, günstige Anleihen für einmalige Investitionen, Informationskampagnen, etc.). Erst mit solchen realitätsnahen Pilotversuchen wird es möglich sein, die Effektivität und Kosten besser abzuschätzen. Dies gilt insbesondere für die Tiefpflug-Bodenumwälzung, das reduzierte Pflügen sowie für das Einbringen von zertifizierter Pflanzenkohle.

C) Umsetzung

Verlaufen auch die Pilotversuche erfolgversprechend, könnte eine gezielte Umsetzung von neuen Politikinstrumenten folgen. Lektionen aus Pilotversuchen sind in der Umsetzung zentral, die Rolle von kontinuierlich verbesserten Kommunikationswegen kann über Erfolg oder Scheitern entscheiden.

Als unmittelbare Massnahme könnte der Kanton prüfen einen Zertifizierungsprozess für Pflanzkohle vorantreiben und anregen, dass ein solcher möglicherweise schweizweit eingeführt werden könnte bzw. allenfalls von Dritten angeboten würde.

5. Beschleunigte Verwitterung

Bei der beschleunigten Verwitterung werden im Folgenden Optionen identifiziert, die die Landwirtschaft, den Unterhalt von Kantonsstrassen und den Umgang mit Zement betreffen. Die identifizierten Optionen umfassen folgende Ansätze:

- Ausbringen von Gesteinsstaub auf Landwirtschaftsböden
- Ausbringen von Gesteinsstaub auf Strassenrändern und Grünstreifen z.B. zwischen Fahrradwegen und Kantonsstrassen oder auf Flachdächern
- Beschleunigte Verwitterung von Zement im Zuge der Wiederverwertung

5.1. Wissensstand

Die natürliche Verwitterung von Mineralien (z.B. Basaltgesteine oder Olivine) könnte in absichtlich beschleunigter Form als CO₂-Entfernungsmassnahme eingesetzt werden. Dabei bestehen Unsicherheiten bezüglich der Reaktivität und entsprechenden Verwitterungsraten, wenn Mineralpulver auf verschiedenen Oberflächen ausgebracht würde. Das globale Potenzial wird auf 0 bis 100 Gt CO₂/a geschätzt, wobei das grösste Potenzial in warm-feuchten Klimaregionen wie z.B. in Indien, Brasilien, Südostasien und China liegt (Strefler et al., 2018). Die internationale Literatur nennt eine weite Kostenspanne von 15 bis 3460 USD/tCO₂, wobei Schätzungen für die Schweiz zwischen 20 und 1000 CHF/tCO₂ liegen (Fuss et al., 2018; Akademien der Wissenschaften, 2018; Beuttler et al., 2019).

Der Vorteil der beschleunigten Verwitterung liegt darin, dass im Gegensatz zu anderen Ansätzen grundsätzlich kein Landnutzungskonflikt oder Konflikt um beschränkte Biomasse-Ressourcen entsteht; im Gegenteil scheinen verschiedene Effekte sogar wünschenswert: die chemische Reaktion der Verwitterung wirkt der Versauerung von Böden und Gewässern entgegen, die Anwendung von Basalt würde auch Phosphor, Magnesium und Kalzium verfügbar machen und neben der mineralischen würde auch die organische Speicherung von Kohlenstoff begünstigt. Andererseits besteht die Sorge, dass die Ausbreitung von Staubpartikeln gesundheitsschädlich wirken könnte oder ungewollte sekundäre Effekte in der Bodenökologie oder Chemie auftreten könnten. Aufgrund solcher Unsicherheiten wird die beschleunigte Verwitterung kontrovers betrachtet und es ist davon auszugehen, dass vor einer allfälligen Anwendung in dieser Hinsicht ausführliche Untersuchungen auch zur Zulässigkeit solcher Anwendungen notwendig wären. Inwieweit

eine ungewollte Verbreitung z.B. durch den Wind oder Wasser dank gezielter Massnahmen im Einsatz minimiert werden könnte, ist noch unklar. Die maximal sinnvolle kumulative Menge an Mineralien könnte in der Grössenordnung von ca. 15kg/m² (oder 8 mm) an Staub liegen. Eine jährlich sinnvollerweise auszubringende Menge wäre wohl ca. ein Zehntel von der kumulativen Menge, was erlauben würde, dass die Mineralien kontinuierlich in den Boden eingearbeitet bzw. teilweise ausgewaschen würden (Strefler et al., 2018). Die Verwitterungsrate hängt vom Gestein und dessen Korngrösse ab, wobei bei Basaltgestein mit einer Grössenordnung von einem Drittel der ausgebrachten Menge gerechnet werden kann (dabei ist der CO₂-Ausstoss durch den Prozess des Abbaus, Vermahlens und Transportes schon eingerechnet; für Olivine würde wohl 1 t Material pro tCO₂ reichen; Taylor et al., 2016). Neben der wissenschaftlichen Unsicherheit bei der bodenspezifischen Verwitterungsrate stellt auch die Logistik eine Unsicherheit sowohl für die Kosten, wie auch für das Potenzial dar. So mangelt es aktuell an Erfahrungen mit der massiven Versorgung und Verteilung von solchen feingemahlene Mineralien und nur in wenigen Versuchsprojekten wurde bisher die Wirkungsweise unter realitätsnahen Umständen über längere Zeit untersucht³².

Es stellt sich auch die Frage, wie die langfristige Effektivität auf verschiedenen Oberflächen (z.B. auf landwirtschaftlichen Flächen oder Waldböden) wäre, und welche sonstigen positiven oder negativen Nebeneffekte jeweils zu erwarten wären. Insbesondere für grössere Anwendungen fehlen bisher vollständige Lebenszyklusanalysen zur CO₂-Bilanz, was in Anbetracht nicht unbeachtlicher Energieaufwendungen für Gewinnung, Vermahlung, Transport und Ausbringen ein zentrales Hindernis für präzisere Potenzialabschätzungen darstellt. Die Kosten der beschleunigten Verwitterung (für den Abbau, das Zermahlen, den Transport und die Ausbreitung) lassen sich aufgrund grosser Unsicherheiten bzgl. der notwendigen Korngrösse und mangels Vergleichswerte kaum abschätzen; bestehende internationale Schätzungen entsprächen einer Grössenordnung von 70-140CHF/tCO₂ je nach Korngrösse.

Zement hat ebenfalls eine CO₂-Aufnahmewirkung, wobei durch Vermahlen von Bauschutt eine beschleunigte Aufnahme von CO₂ erzielt werden könnte. Dies könnte ggf. auch in einem Reaktor unter Zugabe von CO₂ aus der Luft (z.B. aus DAC oder einem Biomasse-Energiekraftwerk mit CO₂-Abscheidung) durchgeführt werden. Eine solche Form der beschleunigten Verwitterung wäre jedoch durch die verfügbare Menge an recyceltem Zement limitiert³³.

³² Die Olivine Foundation hat beispielsweise bisher hauptsächlich in den Niederlanden sowie in Vietnam und im Oman mehrere Projekte geplant und teilweise umgesetzt (Olivine Foundation Netherlands, 2019).

³³ Beuttler et al. (2019) schätzen das theoretische schweizweite Potenzial auf 2,5 Mt CO₂/a (jedoch nur bei gegebener Versorgung mit genügend recyceltem Zement und atmosphärischem CO₂).

5.2. Ist-Zustand für den Kanton und Stadt Zürich

Die beschleunigte Verwitterung ist ein neues Thema im Kontext der Minderungsanstrengungen von Stadt und Kanton Zürich. Prinzipiell könnte die beschleunigte Verwitterung auf landwirtschaftlichen Flächen, Bords und Grünstreifen entlang von Strassen und Radwegen ausserorts sowie Flachdächern angewendet werden, womit die Flächenverfügbarkeit – sofern verschiedene Akteure wie z.B. Landwirtinnen und Landwirte mitmachen – nicht limitierend wäre. Der Wissensstand und das Verständnis um praxisrelevante Zusammenhänge und Barrieren sind jedoch in der gesamten Kategorie der beschleunigten Verwitterung noch ungenügend, weshalb hier vorerst nur angewandte Studien sinnvoll erscheinen (s. Empfehlungen weiter unten) und die Potenzialschätzung nur der ersten groben Orientierung dient.

5.3. Kosten und Potenziale

Sofern keine negativen Nebeneffekte den Einsatz auf gewissen Flächen verbieten, scheint das technische Potenzial von beschleunigter Verwitterung nicht von der Flächenverfügbarkeit, sondern vielmehr von der Verwitterungsrate und der durch die Logistik beschränkten maximal realisierbaren jährlichen Ausbringungsrate beschränkt. Wir treffen die Annahme, dass die Senkenwirkung 1/3 der ausgebrachten Menge an Basaltstaub beträgt³⁴, was einer Menge von jährlich 1.5 kg/m² (also 15 t/ha) entsprechen würde. Die Senkenwirkung wäre also jährlich maximal 5 tCO₂/ha, wobei das technische Potenzial durch die logistisch zu bewältigende Menge an Basaltstaub aufgrund der logistischen Zusatzbelastung limitiert wäre (hier angenommen: 125.000 t Gestein pro Jahr ³⁵), was für das technische Potenzial auf eine Grössenordnung von 40.000 tCO₂ hindeutet.

Das reale Potenzial berücksichtigt demgegenüber zusätzliche Einschränkungen für die mittelfristige Ausbringungs- und Produktionsrate. Als optimistisches Szenario nehmen wir an, dass sich die Anwendung der beschleunigten Gesteinsverwitterung weitgehend als attraktiv herausstellt und eine flächendeckende Ausbringung zu geringen Kosten möglich ist. Das pessimistische Szenario geht davon aus, dass die logistische Herausforderung und die damit verbundenen Kosten zu gross sind oder dass Gesundheitsrisiken sowie ökologische Probleme den Einsatz verbieten.

Das Potenzial der Verwitterung von Zement in Reaktoren ist abhängig von der Verfügbarkeit von CO₂ (aus DAC oder BECC Anlagen) und der Zementmenge. Beuttler et al. (2019) schätzen das

³⁴ Berücksichtigt man die (bisher ungenügend beforschte) Karbonatisierung zusätzlich zur beschleunigten Verwitterung könnte die Senkenwirkung einer Tonne Gestein grösser ausfallen.

³⁵ Die schweizweite Produktion von Kies als Vergleichswert liegt bei 30 Mio. m³. Sollte eine Machbarkeitsstudie ergeben, dass grössere Mengen an Mineralstaub nachhaltig produziert werden können, liesse sich die Potentialprojektion entsprechend nach oben korrigieren.

theoretische schweizweite Potenzial auf 75.000 tCO₂, das theoretische Potenzial im Kanton Zürich könnte demnach in der Grössenordnung von maximal 14.000 tCO₂/a liegen. Dabei ist das realistische Potenzial jedoch für die Entwicklungs- und Testzeit solcher neuen Anlagen (sowie des dabei produzierten recycelten Zements) wohl für viele Jahre vorerst nahe null und erst ab einer grossskaligen Pilotierung bei wenigen tausend Tonnen.

Tabelle 5: Grössenordnungen von Kosten und Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernungsansätze durch beschleunigte Verwitterung (Werte für den Kanton inkl. Stadt)

Massnahme			Mineral-Ausbringung auf Landwirtschaftsflächen			Mineral-Ausbringung auf Strassenrändern, Grünstreifen und Flachdächer			Verwitterung von Zement in Reaktoren		
Technisches Potenzial			35.000 tCO ₂ /a			5.000 tCO ₂ /a			Heute null; bei proof of concept bis ca. 15.000 tCO ₂ /a		
Limitierende Faktoren			Eignung auf verschiedenen Böden und Kulturen; logistische Herausforderung bei grossen Mengen; Adoptionsrate der Landwirte			Logistische Herausforderung bei grossen Mengen			Verfügbarkeit von CO ₂ , Zement, Machbarkeit der Reaktoren und Nutzbarkeit des Recycling-Zementes		
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO ₂ /a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kanton	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	optimistisch	Stadt	0.035	0.2	0.35	0	0.02	0.03	0.25	2.5	7.5
		Kanton	3.5	20	35	0.5	2	3	0.5	5	15
Kosten (CHF / tCO ₂)	pessimistisch		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	optimistisch		100	100	100	100	100	100	150	100	80

5.4. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Um die Praktikabilität, Effektivität und Skalierbarkeit solcher Anwendungen zu prüfen, besteht ein Bedarf an angewandter Forschung sowie Pilotversuchen. Einerseits sollte geprüft werden, inwieweit Erkenntnisse aus dem Ausland in der Schweizer Landwirtschaft anwendbar und ob eine Anwendung von Mineralstaub unproblematisch wäre. Umsetzungsrelevante Wissenslücken, welche durch angewandte Forschung geschlossen werden könnten, umfassen insbesondere:

- Was sind realistische Produktionskapazitäten und Transportkapazitäten für Gesteins-Staub zur Anwendung im Kanton Zürich?
- Welche biochemischen Nebeneffekte sind für Boden- und Wasserökosysteme zu erwarten?

- Welche Nebeneffekte bestehen für die landwirtschaftliche Produktion (positive Düngewirkung und ggf. negative Effekte)?
- Welcher Energieaufwand und welche CO₂-Bilanz sind mit der Gewinnung, des Vermahlens und Transportes grosser Mengen Materials verbunden?
- Was sind die Gesundheitsrisiken des Staubes?
- Lässt sich der Ansatz insgesamt unter praxisnahen Bedingungen sinnvoll umsetzen?

Neben der möglichen Anwendung auf landwirtschaftlichen Flächen könnte eine kleinskalige Anwendung auch auf Grünflächen und Strassenrändern geprüft werden, wo die öffentliche Hand einen direkten Einfluss hätte. Hier könnten in Pilotversuchen einzelne Grünflächen für einige Jahre mit Mineralien zur beschleunigten Verwitterung versetzt werden, wobei insbesondere auch die Praktikabilität bei kleineren Flächen zu prüfen wäre.

Die Entwicklung möglicher Reaktoren für die Verwitterung von recyceltem Zement könnte durch öffentliche Unterstützung beschleunigt werden. Hier liegt das mittelfristige Potenzial jedoch im Zementsektor selber, wobei Veränderungen in Material- und Baustandards wohl eine Voraussetzung für die Anwendung von entsprechenden CO₂-armem Zement wären.

6. Biomasse und CCS (KVA-CCS und BECCS)

Die Nutzung von Biomasse zur Strom- und Wärmegewinnung wie auch die Verbrennung von Biomasse in Kehrlichtverwertungsanlagen kann in Kombination mit dem Abscheiden und Speichern von CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) zu einer CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre führen. Es sind also grundsätzlich zwei Varianten denkbar:

- Kehrlichtverwertungsanlagen (KVA) mit CCS,
- Biomassekraftwerke (Strom und Fernwärme) mit CCS, und
- Klärschlammverbrennung mit CCS.

Für die Bioenergie-Kohlenstoff-Abscheidung und -speicherung (mit der englischsprachigen Abkürzung BECCS) ist die Verkettung von vier Elementen notwendig: 1. die Verwertung von Biomasse entweder als regulärer Anteil in der Müllverwertung oder in Form von Holzprodukten aus der Forstwirtschaft (s. Kapitel 2) in Kraftwerken (also die Buchstaben BE im Akronym); 2. die Abscheidung von CO₂ während dem Verwertungsvorgang (die Buchstaben CC im Akronym); 3. der Transport von CO₂ zur Lagerstätte, und 4. die geologische Speicherung von CO₂ (der Buchstabe S im Akronym).

Bei der Klärschlamm-Verbrennung könnten möglicherweise heute noch nicht vorhandenen Technologien zur CO₂-Abscheidung künftig ein zusätzliches CO₂-Entfernungspotential eröffnen. Dazu gibt es jedoch weltweit jedoch noch keine Konzepte oder Machbarkeitsstudien.

6.1. Wissensstand

Die Emissionspfade des IPCC (2014b, 2018) für eine Begrenzung auf 1.5°C oder 2°C Erwärmung stützen sich auf massive Mengen an BECCS: verschiedene Szenarien enthalten weltweit jährlich 1-85 GtCO₂-Entfernung durch BECCS. Bei einer Pro-Kopf Verrechnung entspräche dies für die Schweiz einer Entfernrungsrate in der Grössenordnung von rund 1-95 MtCO₂/a für die Schweiz (Beuttler et al., 2019).

Kosten werden in globalen Mittelwerten und je nach Technologie (Umwandlungstechnologie, CO₂-Abscheidetechnologie usw.) auf 15 bis 400 USD/tCO₂ geschätzt (Fuss et al., 2018). Hierbei spielen jedoch standortspezifische Faktoren (Entfernung vom Ort der CO₂-Abscheidung zum geologischen Speicherort, verfügbare Transportmittel für CO₂ und Eigenschaften des geologischen Speicherorts) eine grosse Rolle, weshalb die Spannweite der erwarteten Kosten derart gross ist. Erste Schätzungen für die Schweiz werden auf eine Spannweite von 50 - 250 CHF/tCO₂ beziffert (Akademien der Wissenschaften, 2018; Beuttler et al., 2019), für eine verlässliche Schätzung für den Schweizer Kontext fehlen jedoch bisher Erfahrungswerte.

Da BECCS aus verschiedenen Einzelprozessen besteht, besitzt jeder dieser Prozesse spezifische Kosten, Unsicherheiten und Begrenzungen. Grundsätzlich lassen sich die Prozesse in a) Verwendung von Biomasse und «Einfangen» von CO₂, und b) Transport und geologische Speicherung von CO₂ zusammenfassen.³⁶

Limitierend könnte mittelfristig die Menge der zur Energieproduktion verfügbaren Biomasse wirken (s. hierzu auch das Kapitel zum Forstsektor). Die geologische Speicherkapazität stellt eine weitere wichtige physische Limitation dar. So wird davon ausgegangen, dass diese zwar global nicht limitierend ist und auch das theoretische Potenzial in der Schweiz gross genug wäre.³⁷ Bei der geologischen Lagerung muss jedoch auch der vorgeschaltete Transport von CO₂ berücksichtigt werden. Der Erfolg der geologischen Lagerung selbst hängt davon ab, dass es poröse Gesteinsschichten gibt, welche das CO₂ aufnehmen können und die genügend abgedichtet sind, so dass das CO₂ nicht entweichen kann (Leakage-Problematik)³⁸. Dazu ist ein Monitoring-System notwendig, wie es beispielsweise auch die CCS-Grundsätze des *Clean Development Mechanism*

³⁶ Das für BECCS beschriebene Einfangen, Transportieren und geologische Speichern von CO₂ ist auch für DACCS relevant.

³⁷ Das globale Potenzial wird auf zwischen 320 und 50.000 GtCO₂ geschätzt (Fuss et al., 2018). Das theoretische Schweizer CCS Potenzial wird auf 2.700 Mio tCO₂ geschätzt (Chevalier et al., 2010).

³⁸ Bei Transport und Verpressung bestehen auch gewisse Risiken im Umgang mit vielen Tausend Tonnen CO₂; der IPCC (2005) nennt hier insbesondere Risiken im Umgang mit Pipelines die unter Druck stehen (Leakage und Korrosion), sowie bei der Verpressung in den Untergrund (Leakage aus dem Boden oder in Grundwasserträger sowie geologische Frakturen und seismische Wirkungen).

vorsehen. Entscheidend bei der Auswahl potenzieller Lagerstätten sind also die geologischen Verhältnisse³⁹, zur praktischen Umsetzung können jedoch Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz letztlich Ausschlag darüber geben, ob eine Speicherstätte überhaupt in Frage kommt. Darüber hinaus müssten in der Berechnung der Gesamtwirkung allfällige Emissionen während der Zwischenlagerung von Biomasse, sowie Transportemissionen berücksichtigt werden.

Kasten 2: Geologische Speicherung von CO₂ in der Schweiz

In Bezug auf die geologische Speicherung von CO₂ wurden bislang keine spezifischen Standorte in der Schweiz bestimmt, sondern lediglich potenzielle Speichergesteine identifiziert. Die Vorlaufzeiten für eine allfällige Realisierung eines solchen Speicherprojektes wären sehr lange (weit über 10 Jahre). Das heisst, dass mit einer allfälligen geologischen Speicherung von CO₂ in der Schweiz wohl frühestens Ende der 30er Jahre begonnen werden könnte.

Derzeit werden in mehreren europäischen Ländern (Norwegen, UK und Niederlande) Offshore-Speicherprojekte entwickelt. Das norwegische «Northern Lights» Projekt sieht eine gewisse Flexibilität bzgl. der Aufnahme von CO₂ aus europäischen Quellen vor.⁴⁰ Das sich in der Entwicklung befindliche Speicherprojekt soll bis 2024 in Betrieb gehen und es besteht das Potenzial, die Kapazität zur Aufnahme und geologischen Speicherung von CO₂ schrittweise zu erhöhen. Vor der britischen Küste ist ein weiteres Open-Source-Projekt zur geologischen Speicherung von CO₂ geplant.

6.2. Ist-Zustand im Kanton Zürich

Im Kanton Zürich gibt es schon heute einzelne Elemente, die in einer künftigen BECCS-Kette wirken könnten. Zu unterscheiden sind in diesem Zusammenhang die Biomassekraftwerke im Kanton, die Kehrrechtverwertungsanlagen (KVA), und die Verbrennung von Klärschlamm welche prinzipiell mit Carbon-Capture (CC) Technologie ausgestattet werden könnten. Aktuell gibt es im Kanton zwei Biomassekraftwerke, die auf Basis von Altholz Strom und Wärmeenergie produzieren, wobei jährlich total knapp 45.000 t Holz verwertet werden.⁴¹ Daneben sind insgesamt sechs (künftig fünf) KVAs im Kanton operativ (davon zwei KVA in der Stadt – KVA Josefstrasse⁴² und KVA Hagenholz –, die im nachfolgenden Kapitel 6.3 diskutiert werden). Im Klärwerk Werdhölzli werden zudem jährlich bis zu 100.000 t Klärschlamm verwertet. Diese Anlagen könnten möglicherweise nachträglich mit Carbon-Capture-Technologie ausgestattet werden, wobei es mit derartigen Retrofits weltweit bisher nur wenige Erfahrungen gibt.

³⁹ Beispielsweise spezifiziert der IPCC (2005) in seinem CCS-Sonderbericht, dass bei angemessener Auswahl eines geologischen Speicherortes dieser höchstwahrscheinlich das CO₂ für mindestens 100 und wahrscheinlich für mindestens 1000 Jahre speichern kann.

⁴⁰ Siehe auch Northern Lights (o. D.).

⁴¹ Das Kraftwerk Otelfingen verarbeitet jährlich rund 30 kt Altholz zu rund 20 GWh Strom; das Kraftwerk Weinigen jährlich rund 23 kt Altholz zu 17,5 GWh Strom (BKW Energie AG, 2020; Richi AG, 2020)

⁴² Die KVA Josefstrasse wird im Frühjahr 2021 eingestellt und ab 2026 durch eine dritte Ofenlinie beim KVA Hagenholz ersetzt.

Insgesamt wurden im Kanton im Jahr 2015 rund 0,7 Mio t Abfall aus dem Kanton Zürich verwertet.⁴³ Soweit im darin verarbeiteten Müll auch Biomasse enthalten ist, könnte dadurch eine CO₂-Entfernung bewirkt werden. Die Anteile der in KVA und im Klärwerk verbrannten Biomasse werden jedoch aktuell nicht erfasst. Entsprechend der Emissionsfaktoren des Schweizer THG Inventars gehen wir davon aus, dass die verbrennbaren Anteile der Abfälle in KVA zu 52% biogenen (bzw. 48% fossilen) Ursprungs sind.

Bezüglich der geologischen Speicherung im Kanton Zürich gibt es keine spezifischen Daten. Es ist aber davon auszugehen, dass die beiden Aquifere Muschelkalk (bestehend aus Kalk- und Dolomitgestein) und Oberer Malm (bestehend aus Kalkstein) theoretisch infrage kämen, wobei Muschelkalk mit rund 200 Mio tCO₂ die deutlich grössere Menge speichern könnte (Regierungsrat des Kanton Zürich, 2019). Gesamtschweizerische Speicherpotenziale wurden von Chevalier et al. (2010) auf 2.7 Mia. tCO₂ geschätzt. Aufgrund der sehr lange dauernden Vorlaufzeiten für CCS-Projekte ist davon auszugehen, dass schweizerische Speicherpotenziale selbst bei einer sofortigen Projektinitialisierung erst ab den späten 30er-Jahren ins Gewicht fallen könnten. Ob in der dicht besiedelten Schweiz CCS überhaupt jemals zur Anwendung kommt, ist sehr ungewiss, insbesondere da auch die Gefahr der Erzeugung von induzierter Seismizität besteht, was in derart dicht besiedelten Regionen schon bei geringen Ausmassen ins Gewicht fällt. Kurz- bis mittelfristig wären möglicherweise die Speichermöglichkeiten im Ausland oder die Transportkapazitäten dahin limitierend für das gesamte Potenzial der CO₂-Entfernung mit geologischer Speicherung (BECCS, KVA-CCS sowie DACCS).

6.3. Ist-Zustand für die Stadt Zürich

Im Einflussbereich der Stadt gibt es ein Holzkraftwerk (Aubugg), welches jährlich rund 70.000 t Holzschnitzel umsetzt⁴⁴.

Daneben gibt es zwei KVA, wobei die KVA Josefstrasse im 2021 stillgelegt und dafür die KVA Hagenholz stark vergrössert wird. Die KVA Hagenholz könnte mit CC-Technologie ausgerüstet werden, um negative Emissionen zu erzielen; dabei werden voraussichtlich ab 2026 jährlich ca. 360.000 t Abfall⁴⁵ verarbeitet. Auch hier stellt sich im Kontext einer möglichen CO₂-Entfernungswirkung die Frage, wie gross der Biomasse-Anteil im verwerteten Müll exakt sein wird, da dieser Wert Auskunft darüber gäbe, wie gross eine allfällige Senkenwirkung wäre (wobei der Anteil des Abfalls fossilen Ursprungs durch CCS zu einer Emissionsreduktion führen würde).

⁴³ Die grösseren Anteile entfielen auf die KVA Winterthur und KVA Hinwil (mit jeweils 190kt), sowie 92kt auf das KVA Limmattal und 35kt auf das KVA Horgen (AWEL, 2020, 2018b); die dem Kanton zugeordneten Mengen umfassen also rund 340.000t.

⁴⁴ Das Holzheizkraftwerk Aubugg verwertet jährlich rund 70 kt Tonnen Holzschnitzel zu 45 GWh Strom (HHKW Aubugg AG, 2020).

⁴⁵ Das KVA Hagenholz verarbeitet eine jährliche Abfallmenge von bis zu 240.000 t zu rund 129.000 MWh Strom und das KVA Josefstrasse rund 110.000 t Abfall in 47.000 MWh Strom (AWEL, 2020, 2018b).

6.4. Kosten und Potenziale

In der Projektion von theoretisch möglichen Potenzialen gehen wir davon aus, dass alle heute vorhandenen sowie ggf. neu geplante KVA und Biomassekraftwerke mit CC-Installationen ausgestattet werden könnten, wodurch 90-99% der Kohlenstoffmenge abgeschieden werden könnte. Dies würde sowohl eine Minderung der CO₂-Emissionen (entsprechend der im Abfall enthaltenen Kohlenstoffmenge fossilen Ursprungs), wie auch eine CO₂-Entfernung (entsprechend der Menge biogenen Abfalls) bewirken.

Des Weiteren gehen wir von einem Planungs- und Umsetzungshorizont (konkrete Potenzialabschätzung, Exploration, Standortsuche, Konsortialaufbau, Planung und Implementierung) von 10-20 Jahren aus, so dass eine geologische CO₂-Speicherung in der Schweiz frühestens gegen 2040 möglich wäre, selbst wenn zeitnah eine politische Entscheidung zugunsten des Einsatzes von CCS fallen sollte. Bis zu diesem Zeitpunkt würde CO₂ zur Speicherung zu Offshore-Speicherstätten in Norwegen, den Niederlanden oder dem Vereinigten Königreich transportiert. Dieser Umstand wird a priori nicht als limitierend betrachtet, jedoch wird hier angenommen, dass die Speicherung durch CCS ausserhalb des Kantons nur hälftig als Senke angerechnet werden kann, da der «gastgebende» Staat für die Eigenleistung der Speicherung einen hälftigen Anteil der Minderung verbucht⁴⁶.

Die Betriebskosten von KVA und Kraftwerken werden näherungsweise als unabhängig von CCS-Massnahmen angenommen und dementsprechend vernachlässigt; die Zusatzkosten, die mit den nachgeordneten Schritten «Einfangen»-Transport-Speicherung (CCS) einhergehen, werden auf langfristig mindestens 70, eher aber eine Grössenordnung von mindestens 100-130 CHF/tCO₂ geschätzt, während die Kosten kurzfristig eher über 300 CHF/tCO₂ zu liegen kommen.⁴⁷

Die Beschränkung des technischen Potenzials von Biomassekraftwerken, KVA und Klärschlammverwertung ergibt sich aus der zu verarbeitenden Menge an Biomasse (Abfall, Energieholz und Klärschlamm). Bei der Verarbeitung einer Tonne Holz entstehen ca. 1,63 tCO₂⁴⁸. Die verarbeiteten Abfallmengen basieren auf Projektionen des AWEL (2018b) und der Emissionsfaktor von 1,1 tCO₂/t Abfall dem Schweizer Emissionsinventar, wobei von der verbrennbaren Masse ca. die Hälfte (entsprechend 0,55 tCO₂/t Abfall) biogen und die andere Hälfte fossilen Ursprungs ist

⁴⁶ Es wäre aber auch denkbar, dass ein Gastland – gegen einen entsprechenden Aufpreis – auf jegliche Anrechnung verzichtet. Da es bisher noch keine entsprechenden bilateralen Absprachen und auch unter dem Pariser Abkommen kein internationales Regelwerk gibt, ist dies nur eine Annahme, da grundsätzlich beide Parteien berechtigtes Interesse daran haben dürften, die CO₂-Speicherungsleistung als Minderungsleistung zu verbuchen.

⁴⁷ Der Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) nennt eine auf Arbeiten des ETH Sus.Lab basierende Schätzung der Kosten bei Transport aus der Schweiz nach Norwegen zur Speicherung in Pilotanlagen von 340 CHF/tCO₂, mit der Erwartung, dass die Preise auf 110 CHF/tCO₂ sinken würden. Internationale Schätzwerte, welche um einen Faktor 15% verteuert würden um die schweizerischen erhöhten Lohnkosten abzubilden ergäben eine Grössenordnung von 170-300 CHF/tCO₂.

⁴⁸ Gemäss dem Nationalen THG Inventar Bericht der Schweiz (BAFU, 2016, Tabellen 3-52).

⁴⁹. Die Nachfrage nach Wärme oder Strom ist nicht limitierend.⁵⁰ Bei der Klärschlamm-trocknung werden aus rund 100'000t Material 30'000t Trockenklärschlamm, was bei einem Emissionsfaktor von 0.89tCO₂/t und einer Abscheideeffizienz von 90% (sehr unsicher) einem maximalen Potential (Kanton) von rund 24'000tCO₂/a entspräche.

Das reale Potenzial könnte zudem durch Einschränkungen in der CO₂-Transportkapazität, vor allem durch gesellschaftlichen Widerstand, begrenzt werden.⁵¹ Das pessimistische Szenario geht hier davon aus, dass die Widerstände gegenüber grossangelegtem Transport von CO₂ CCS-basierten Ansätze verhindern.⁵² Das optimistische Szenario geht demgegenüber davon aus, dass ab 2040 eine CO₂-Pipeline den kostengünstigen (10-20 CHF/tCO₂ gem. IPCC; 2005) Transport in die Niederlande ermöglicht und davor der Transport mit Lastwagen oder per Bahn und ggf. via Binnenschifffahrt auf dem Rhein erfolgen kann, um das CO₂ im Ausland zu speichern. Ob im Inland Speicherkapazitäten mobilisiert werden könnten, ist heute noch nicht absehbar und bleibt wohl für lange Zeit unsicher, somit ist der grenzüberschreitende Transport von CO₂ (zur Speicherung z.B. in den Niederlanden oder Norwegen) zwingend. Im Fall des Lastwagen- und Schiffs-transportes könnte die Transportkapazität limitierend wirken für die Gesamtsumme aus KVA-CCS, BECCS (und DACCS). Das theoretische Minderungspotenzial (Emissionsreduktions- plus CO₂-Entfernungswirkung) von KVA-CCS (rund 687.000 tCO₂ (heute) bzw. 844.000 tCO₂ (2050)), sowie die Potenziale von BECCS, Klärschlamm-CCS und DACCS könnten also möglicherweise noch bewältigbar bleiben⁵³.

⁴⁹ Diese sieht eine totale Kapazität der KVA im Kanton vor, welche von heute jährlich ca. 700.000 t Abfall bis 2035 auf 830.000 t steigt. Hierbei soll der Mehraufwand von den KVA Limmattal und Winterthur geschultert werden. Wir leiten die Projektion der Abfallmengen von diesen Zahlen her, wobei sich die Steigerung zum Zeithorizont 2040 bzw. 2050 abflacht (2030: 800.000 t; 2040: 850.000 t; 2050: 860.000 t); der Emissionsfaktor von Abfall ist gemäss Schweizer Treibhausgasinventar 1,09 tCO₂/t Abfall. Der Biomasse-Anteil in diesen Abfällen wird als konstant bei 50% angenommen, daher entspricht die Hälfte des CO₂ einer Emissionsminderung und die zweite Hälfte einer CO₂-Entfernung. Bei einer Abscheidungseffizienz von 90% ergäben also 700'000 t Abfall ein gesamtes Minderungspotenzial von 686.700 tCO₂ bzw. ein Senkenpotenzial von 343.350 tCO₂.

⁵⁰ Zwar sinkt wohl der kantonale Energiebedarf für Fernwärme und Strom aufgrund von Effizienzsteigerungen von rund 24.000 GWh in 2015 auf knapp 21.000 GWh in 2050 (AWEL, 2016, 2018b). Der Wärmebedarf sinkt stärker (15.200 GWh in 2015, 11.600 GWh in 2050), während die Stromnachfrage annähernd konstant bleibt (8900 GWh in 2015, 9100 GWh in 2050). Wir nehmen an, dass biomassebasierte Energie kontinuierlich vollumfänglich vom Markt aufgenommen werden wird, wodurch bei der Nachfrage keine Limitierung entsteht.

⁵¹ Das EU Forschungsprojekt *Elegancy* erörtert aktuell verschiedene Optionen des CO₂ Transportes mit Beteiligung der ETH und des PSI: <http://www.act-ccs.eu/elegancy>.

⁵² Bisherige Erfahrungen mit der Planung von CCS-Vorhaben (inklusive des Baus von Transportinfrastruktur) deuten darauf hin, dass der mögliche gesellschaftliche und politische Widerstand nicht unterschätzt werden sollte (Seigo et al., 2014).

⁵³ Mangels exakterer Projektionen: eine Kapazität von rund 100 Lastwagen pro Tag für den Kanton entspräche einer jährlichen Menge von rund 1 Mio tCO₂ für Emissionsminderung und CO₂-Entfernung durch KVA-CCS, BECCS und DACCS.

Tabelle 6: Schätzungen zu den Kosten und Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernung durch BECCS und KVA-CCS (Werte für den Kanton inkl. die Stadt)

Massnahme			Biomasse-Kraftwerk mit CCS			KVA mit CCS			Klärschlammverbrennung mit CCS		
Technisches Potenzial bei heutigen Mengen in der Stadt Zürich und im Kanton (inkl. Stadt)			120.000 tCO ₂ /a 200.000 tCO ₂ /a			167.000 tCO ₂ /a 345.000 tCO ₂ /a			24.000 tCO ₂ /a*		
Limitierende Faktoren			Menge an Energieholz (Trade-off mit weiteren Nutzungen von Holz für Senken), Transport- bzw. Speichermöglichkeiten			Transport- bzw. Speicherkapazität					
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO₂/a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kanton	0	0	0	0	0	0			
	optimistisch	Stadt	60	120	120	197	208	211	12	12	12
		Kanton	100	200	200	393	417	422	24	24	24
Kosten (CHF / tCO₂)	pessimistisch		n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.
	optimistisch		175	175	175	175	175	175	175	175	175

* Bemessen an der maximalen Kapazität der Anlage, effektive Umsätze sind wohl geringer; da die entsprechende CO₂-Abscheidetechnologie noch nicht entwickelt bzw. in der Klärschlammverbrennung angewendet wurde, ist es äusserst unsicher ob dieses technische Potential effektiv besteht.

6.5. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Sollte die Stadt Zürich⁵⁴ oder der Kanton Zürich das theoretisch sehr grosse Minderungspotenzial, das mit CCS auf Basis von Biomasse verbunden ist, mobilisieren wollen, wäre ein grosser politischer Einsatz notwendig. Dies ist sowohl beim Testen und Einsetzen von Kohlenstoff-Abscheidungs-Technologie (bei den KVA und/oder bei Biomassekraftwerken) wie auch bei den späteren Gliedern in der Kette (dem Transport und der Zusammenarbeit mit ausländischen Entitäten zur Speicherung des CO₂) notwendig. Hier sind grosse Synergieeffekte zu vermuten, wobei beispielsweise der Ausbau von Wärmenetzen eine wichtige Voraussetzung für eine sinnvolle verstärkte Nutzung von Biomasse-Energie (mit CCS) darstellt.

Die öffentliche Hand kann beim BECCS-Ausbau sowohl als individueller Akteur als auch im Verbund mit lokalen Akteuren sowie Akteuren aus Behörden, Forschung und Privatwirtschaft auf Bundesebene gezielte Massnahmen auf den Weg bringen. Der erste Schritt wäre es, in einer kooperativen Machbarkeitsstudie die verschiedenen Aspekte einer Wertschöpfungskette für

⁵⁴ ERZ Entsorgung + Recycling Zürich prüft aktuell bereits ein Projekt zur Abscheidung von CO₂ bei der KVA.

KVA-CCS, für die Klärschlamm-CCS, sowie für BE-CCS zu erörtern, wobei die zentralen Akteure in einer solchen Studie eingebunden werden müssten. Dieses Vorgehen müsste auch wissenschaftlich begleitet sein, wobei insbesondere Expertenwissen im Bereich der Lebenszyklusanalyse und der industriellen Logistik sowie von Prozessingenieuren und CCS-Experten eingebunden werden müsste. Ebenso wäre es notwendig, im Rahmen einer solchen Studie die Modalitäten bzgl. einer ausländischen Speicherung (welches Land darf die CO₂-Entfernung verbuchen; ggf. anteilig und zu welchen Kosten?) und mögliche Finanzierungsoptionen etc. zu klären.

Als zweiter Schritt wäre die Pilotierung mit einer Anlage anzustreben, wobei zumindest im Fall von KVA-CCS und Klärschlamm-CCS womöglich neu entwickelte Technologien zum Einsatz kämen. Hierfür wäre eine Kooperation mit Industriepartnern notwendig. Schon im Rahmen eines Pilotierungs- bzw. angewandten Forschungsprojektes sollte zudem aufgrund der Bedeutung der gesellschaftlichen Akzeptanz proaktiv der Dialog mit verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren gesucht werden.

Insgesamt stellt sich die Herausforderung, dass CCS im In- wie auch im Ausland zusätzliche Kosten darstellt (gegenüber der Biomasse-Energie-Gewinnung ohne CCS bzw. die Abfallverwertung ohne CCS). Die öffentliche Hand muss hier marktschaffend eingreifen. Dies kann entweder durch finanzielle Anreize (in Form von inländischen Kompensationsprojekten oder Subventionen, die an der erreichten CO₂-Entfernung bemessen werden) oder über Regulation (z.B. gegen Null oder gar ins Negative tendierende sektorweite CO₂-Emissionsgrenzwerte) erzielt werden. Darüber hinaus könnte die öffentliche Hand in öffentlich-private Partnerschaften eintreten, um die entsprechende Biomasseenergie-CCS-Infrastruktur aufzubauen und zu betreiben. Ebenfalls können öffentliche Unternehmen wie die EWZ oder EKZ in eigener Sache in BECCS-Infrastruktur investieren und die laufenden Kosten als Teil der operativen Kosten abrechnen. Hier wäre zu prüfen, welche institutionellen Hürden dafür zu überwinden wären und ob – beziehungsweise wie weit – die zusätzlichen Kosten möglicherweise als Aufpreis an die Konsumenten weitergegeben werden könnten.

7. Direct Air Capture and Storage (DACCS)

Das direkte «Einfangen» von CO₂ aus der Umgebungsluft könnte mit der geologischen Speicherung von CO₂ kombiniert als eine Form der CO₂-Entfernung eingesetzt werden (DACCS). Hierbei ist auch wie im Fall von BECCS bzw. KVA-CCS der dafür notwendige Transport von CO₂ zu Speicherstätten zu berücksichtigen.

7.1. Wissensstand

Der aktuelle Wissensstand bei DACCS deckt sich in Bezug auf Transport und geologische Speicherung mit den vorherigen Ausführungen zu BECCS. DACCS unterscheidet sich dennoch deutlich von BECCS, da es zwar die CCS-relevanten Produktionsschritte teilt, jedoch nicht an eine energetische Nutzung gekoppelt ist, sondern vielmehr selber einen grossen Energiebedarf aufweist. Dieser ist aufgrund der viel niedrigeren atmosphärischen CO₂-Konzentration (0.03 Vol-%) im Vergleich zur Abscheidung bei Punktquellen (je nach Prozess 10-95 Vol-%) um mindestens einen Faktor 3 grösser, der Vergleichsfall von einem Verbrennungsprozess mit reinem Sauerstoff ist gar über 3 Grössenordnungen energetisch effizienter. Auf der Gegenseite benötigt DACCS dafür keine Biomasse. Der Prozess des direkten «Einfangens» von CO₂ kann dezentral dort installiert werden, wo die benötigte Wärmeenergie und Strom vorhanden sind.

Die internationale Literatur geht davon aus, dass durch DACCS weltweit theoretisch jährlich rund 0,5 bis 5 GtCO₂ entfernt werden könnten. Wie bei BECCS und KVA-CCS ist auch hier das sehr begrenzte schweizerische Speicherpotenzial von rund 2,7 MtCO₂ problematisch. Die Spannweite der erwarteten Kosten liegt zwischen 25 und 1000 USD/tCO₂.

Der Energieaufwand des Prozesses teilt sich in thermische Energie (1600 kWh/tCO₂) und elektrische Energie (400 kWh/tCO₂) auf (Beuttler et al., 2019). DACCS ist somit neben der beschleunigten Verwitterung der einzige Negativ-Emissions-Prozess, welcher einen signifikanten Energiebedarf hat, der selbstverständlich aus CO₂-freien Quellen stammen muss. Wichtig ist, dass der thermische Energiebedarf aus Wärme mit relativ geringer Temperatur (80-120°C) gedeckt werden kann, was bedeutet, dass verschiedene Abwärmequellen in Frage kommen, jedoch teilweise Nutzungskonflikte entstehen könnten.

7.2. Ist-Zustand für den Kanton und die Stadt Zürich

Die Firma Climeworks, eines der weltweit führenden *Direct Air Capture* Unternehmen, hat den Hauptsitz in Zürich und betreibt seit 2017 die erste Pilotanlage auf dem Dach der KVA Hinwil. Diese nutzt die Abwärme der KVA und setzt jährlich 900 t CO₂ um. Da dieses jedoch nicht geologisch gespeichert, sondern in einem Gewächshaus genutzt wird, ist dieser Prozess als näherungsweise CO₂-neutral anzusehen (und nicht CO₂-entfernend).

Durch dieses heimische Expertenwissen könnte der Kanton Zürich als Pilotregion für diese potenzielle Schlüsseltechnologie der Zukunft auftreten. Allerdings gibt es bislang weder auf städtischer noch auf kantonaler Ebene Anwendungen, die gesamte DACCS-Kette abdecken.

7.3. Kosten und Potenziale

Die Kosten für den gesamten DACCS-Prozess würden bei grösseren Anlagen von heute zwischen 600-800 CHF/tCO₂ im optimistischen Szenario bis 2030 auf ca. 250 CHF/tCO₂ sinken (inkl. Transport und ausländische Speicherung; Beuttler et al., 2019). Im pessimistischen Szenario verbleiben die Kosten bis 2030 bei 500 CHF/tCO₂ und sinken auch längerfristig nicht unter 400 CHF/tCO₂. Die Kosten liegen somit mit hoher Wahrscheinlichkeit höher als im Fall von BECCS oder KVA-CCS.

Für das technische Potenzial von DACCS können drei Faktoren berücksichtigt werden: Die Skalierbarkeit der CO₂-Transportinfrastruktur, die Verfügbarkeit von (Ab-)wärme und die Verfügbarkeit von CO₂-neutralem Strom. Gerade die Verfügbarkeit von nachhaltigem Strom für eine DACCS-Anwendung lässt sich kaum vorhersagen, dennoch ist anzunehmen, dass kaum eine konfliktfreie Nutzung möglich ist. Daher wird hier für eine erste Abschätzung der Grössenordnung eine beschränkte Stromverfügbarkeit für DACCS von jährlich rund 105 GWh (Kanton) und davon rund 30 GWh (Stadt) angenommen⁵⁵, wonach das theoretische Potenzial in einer Grössenordnung von 260.000 tCO₂ (Kanton) bzw. 75.000 tCO₂ (Stadt) läge.⁵⁶ Sollte DACCS nur mit Überschussstrom betrieben werden können, würde dies zwar keine zusätzliche Strombelastung darstellen, aber die Kosten je Tonne CO₂ würden sich wohl aufgrund der nur partiellen Laufzeit der Anlagen erhöhen.

Das reale Potenzial wird wie bei BECCS und KVA-CCS durch einen allfälligen Mangel an politischer Unterstützung für CO₂-Transporte oder Speicherung beschränkt. Dabei geht das optimistische Szenario davon aus, dass der Transport von CO₂ für ausländische Speicherung in genügend grossem Mass möglich ist und DACCS demzufolge nicht mit anderen CCS-Nutzungen in Konkurrenz steht. Zudem wird hier davon ausgegangen, dass die Aussicht auf einen längerfristig erhöhten CO₂-Preis genügend hohe Anreize schafft, dass Private den DACCS-Ausbau nach und nach gewinnbringend verfolgen können. Allerdings gehen wir auch im optimistischen Szenario nicht davon aus, dass grosse Strommengen für einen sinnvollen Grosseinsatz von DACCS in Kanton oder Stadt Zürich freigehalten würden. Das pessimistische Szenario geht davon aus, dass der CO₂-Transport limitierend wirkt und somit die wesentlich kostengünstigeren Ansätze KVA-CCS und BECCS eine Anwendung von DACCS in der Schweiz verunmöglichen; zudem wird hier angenommen, dass die weiterhin hohen Kosten nicht durch genügend Anreize kompensiert werden

⁵⁵ Dies entspräche 1% des schweizerischen Stromverbrauchs (600GWh) auf die Kantons- (ohne Stadt-) bzw. Stadtbevölkerung heruntergebrochen.

⁵⁶ Die Verfügbarkeit von Abwärme scheint gegenüber der Stromverfügbarkeit nicht limitierend; würde man den sinkenden Bedarf für Fernwärme für DACCS einsetzen ergäbe dies knapp 2000 GWh, 3000 GWh bzw. 4000 GWh Wärme im Jahr 2030, 2040 bzw. 2050; da jedoch nicht überall, wo Abwärme anfällt, diese auch für DACCS genutzt werden könnte, wird angenommen dass maximal 20% davon für DACCS in Frage kämen; dies entspräche einem theoretischen Potenzial von 1,25 Mio. (2030), 1,87 Mio. (2040) und 2,5 Mio. tCO₂ in 2050.

können. Dementsprechend finden höchstens Pilotprojekte im Rahmen von angewandten Studien mit maximal wenigen hundert Tonnen CO₂-Entfernung statt.

Tabelle 7: Schätzungen zu den Kosten und Potenzialen denkbarer CO₂-Entfernung durch DACCS (Werte für den Kanton inkl. die Stadt)

Massnahme			DACCS		
Technisches Potenzial	Stadt		75.000 tCO ₂ /a*		
	Kanton		260.000 tCO ₂ /a*		
Limitierende Faktoren			Sehr hoher Strom- und Wärmebedarf (für Standortwahl ist letzteres ausschlaggebend)		
Zeithorizont			2030	2040	2050
Potenzial (1000 tCO₂ / a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0
		Kanton	1	2	2
	optimistisch	Stadt	10	30	50
		Kanton	20	60	100
Kosten (CHF / tCO₂)	pessimistisch		800	700	450
	optimistisch		250	120	100

* Ohne inländische Speicherkapazität und ohne CO₂-Pipeline für ausländische Speicherung liegt die transportierbare CO₂-Menge wohl massiv unter dem technischen Minderungspotenzial für KVA-CCS und BECCS zusammengenommen (möglicherweise bei einer Mio tCO₂, was etwa 100 Lastwagen täglich entspräche).

7.4. Massnahmenoptionen für Kanton und Stadt Zürich

Da die DACCS-Technologie bisher nur in Form von Pilotanlagen existiert und vollumfänglich von öffentlicher Förderung abhängig ist, kommt der öffentlichen Hand hier primär die Aufgabe zu, die Forschung und Entwicklung zu unterstützen, sofern diese Technologie für eine künftige CO₂-Entfernung als erfolgversprechend gesehen wird. Auch mittelfristig wird die Herausforderung sein, die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Formen der CO₂-Entfernung zu demonstrieren, wodurch dieser reine CO₂-Entfernungsansatz (der keine nicht-CO₂ basierten Vorteile hat) beispielhaft für die Notwendigkeit grösserer und kontinuierlicher öffentlicher Aufwendungen steht, welche für die grossskaligen CO₂-Entfernung insgesamt notwendig sein könnten.

Zusätzlich zu den finanziellen Aspekten scheint auch hier – wie im Kontext von BECCS und KVA-CCS – der aktive Austausch mit der Öffentlichkeit notwendig, um abschätzen zu können, wie gross die Unterstützung für den Einsatz dieser Technologie sein wird und ob eine zukunftsgerichtete Klimapolitik auch auf einen Beitrag durch DACCS zählen kann.

8. Zusammenfassung der NETs-Potenziale und Kosten

Im imaginären Szenario einer vollständigen Implementierung in allen Bereichen ergäben sich auf Basis der beschriebenen Annahmen in Summe die in Tabelle 4 und 9 dargestellten Grössenordnungen für die maximalen Potenziale für NETs in Kanton und Stadt Zürich.

Tabelle 4: Grössenordnungen der summierten maximalen NETs- Potenziale und entsprechende Kosten im Kanton Zürich (inkl. Stadt) bei vollständiger Umsetzung aller Ansätze (in 1000 tCO₂/a bzw. Mio. CHF/a).

Szenario	Max. Potenzial			Kosten bei max. Anwendung		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Optimistisch	569	928	1067	86	114	120
Pessimistisch	8	35	51	1	2.5	2

Tabelle 5: Grössenordnung der summierten maximalen NETs- Potenziale und entsprechende Kosten in der Stadt Zürich bei vollständiger Umsetzung aller Ansätze (in 1000 tCO₂/a bzw. Mio. CHF/a).

Szenario	Max. Potenzial			Kosten bei max. Anwendung		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Optimistisch	286	396	438	44	58	61
Pessimistisch	1	7	10	.05	.35	.5

* Zur Erreichung dieser Werte wäre der Betrieb von Anlagen durch die Stadt bzw. im Auftrag der Stadt im Umland notwendig (hauptsächlich BECCS oder DACCS).

Der mögliche Beitrag des Waldes bzw. der Forstwirtschaft liegt primär im Erhalten der bestehenden CO₂-Speicher sowie in der Produktion von Holz zur Nutzung als Baumaterial und als Energieträger, insbesondere in Kombination mit CCS. Eine Zunahme der Holzvorräte in anderen Kantonen wird hier in Bezug auf die Anrechnung an ein kantonales oder Stadtzürcher Netto-Null-Ziel vorerst ausgeschlossen, da wohl auch andere Kantone Netto-Null-Ziele verfolgen werden und sich demzufolge ihre Waldsenken selber anrechnen lassen werden⁵⁷. Das Potenzial der Nutzung von Holz als Baumaterial bleibt in der pessimistischen Schätzung bei wenigen tausend Tonnen, während ein optimistischerer Ausblick immerhin ein Potenzial von mehreren zehntausend Tonnen – bei langfristigen Kosten nahe null – ergibt; dabei wird angenommen, dass die Senkenleistung an der Stelle angerechnet wird, wo das Holz verbaut wird.

Das Senkenpotenzial der heute noch intakten Hochmoore, wie auch das Senkenpotenzial im Fall einer Wiedervernässung organischer Böden, ist im hier relevanten Zeithorizont bis 2050 sehr

⁵⁷ Andernfalls könnte dies ein zusätzliches NET- Potenzial im Jahr 2030 in der Grössenordnung von 230.000 tCO₂/a (Kanton) bzw. 60.000 tCO₂/a (Stadt) darstellen

klein, dennoch ist der konsequente Schutz des CO₂-Speichers und die dafür notwendige Aufwertung der verbleibenden Hochmoorflächen essenziell vor dem Hintergrund der dadurch vermeidbaren Emissionen. Einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt der bestehenden CO₂-Speicher im Boden kann die Extensivierung und kontrollierte Wiedervernässung von heute intensiv landwirtschaftlich genutzten organischen Böden leisten.

Das weitere Potenzial im Bereich der landwirtschaftlichen Böden liegt wohl hauptsächlich beim Einsatz von Pflanzenkohle, wobei hier insbesondere im optimistischen Szenario dank frühzeitiger Pilotversuche und einer konsequenten Anwendung ein Ergebnis von bis über 0,1 Mio. tCO₂ Entfernung möglich werden könnte. Das Potenzial durch den langfristigen Aufbau des Humusgehaltes für die CO₂-Entfernung bleibt demgegenüber im Zeithorizont 2030-2050 etwas bescheidener, könnte aber im optimistischen Fall dennoch mehrere zehntausend tCO₂/a betragen.

Das Potenzial der beschleunigten Verwitterung durch Ausbringen von Gesteinsstaub auf landwirtschaftlichen Flächen oder Strassenrändern und Grünflächen scheint durch die logistisch zu bewältigende Menge limitiert und unterliegt Unsicherheiten in Bezug auf allfällige Gesundheitsrisiken oder ökologische Nebeneffekte welche weitere Abklärungen zur Zulässigkeit erfordern; hier könnte das Potenzial in der Grössenordnung von maximal wenigen zehntausend Tonnen CO₂ liegen. Die beschleunigte Verwitterung von Recycling-Zement in Reaktoren könnte darüber hinaus maximal eine Entfernungsrate von etwas über zehntausend Tonnen ergeben; hier sind jedoch bis auf weiteres Pilotversuche notwendig. Darüber hinaus muss festgestellt werden, ob die Qualität des Recycling-Zement mit Material und Baustandards konform ist. Es ist auch zu prüfen, ob ein solcher Verarbeitungsprozess auch wirtschaftlich werden kann, bzw. mit Unterstützung eines realistischen CO₂-Preises attraktiv werden kann. Da dieser Prozess einen Input an CO₂ erfordert, könnte dessen Einsatz mit einer CO₂-Abscheidung aus anderen Bereichen (Biomassekraftwerke, KVA's oder dem direkten «Einfangen» von CO₂) kombiniert werden und das Problem des Engpasses beim Abtransport von CO₂ zur Speicherung reduzieren.

Das NETs-Potenzial scheint sowohl beim Einsatz von CCS bei der Kehrlichtverwertung wie auch bei Biomassekraftwerken im optimistischen Szenario, in dem der grossskalige Transport von CO₂ für die Speicherung im Ausland möglich ist, am grössten zu sein, nämlich mehrere hunderttausend tCO₂/a. Sollte die Abscheidung von CO₂ bei der Klärschlammverbrennung durch künftige technologische Fortschritte möglich werden, würde dies einen zusätzlich einen etwas bescheideneren Beitrag leisten. Allerdings ist diese Form von CO₂-Entfernung mit substantiellen Kosten verbunden, und das Potenzial ist mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet (technisch, wirtschaftlich sowie politisch).

Das Potenzial der direkten CO₂-Entfernung durch DACCS scheint aufgrund des grossen Energiebedarfes eher auf wenige tausend bis maximal zehntausend tCO₂/a limitiert. Während der Wärmebedarf von solchen Anlagen möglicherweise für grössere Mengen gedeckt werden kann,

spricht ein hoher Strombedarf gegen einen massiveren Einsatz von DACCS im Kontext von Netto-Null-Emissionen. Allenfalls könnten Strom-Peaks für DACCS eingesetzt werden (was aber mit höheren Kosten aufgrund partieller Auslastung verbunden wäre). Dennoch könnte die im Kanton Zürich vorhandene Kompetenz in dieser Technologie auch im Ausland eine zunehmend wichtige Rolle im Klimaschutz einnehmen.

Um die Potenziale von NETs optimal zu mobilisieren, ist die Zusammenarbeit zwischen Stadt und Kanton Zürich, sowie Bund und teilweise internationaler Akteure zur Erreichung von Netto-Null-Zielen zentral – insbesondere vor dem Gesichtspunkt signifikanter Planungsprozesse, öffentliche Aufwendungen und der Gefahr von Doppelzählungen. Insbesondere zeigen die Fragen um die Speicherung von CO₂ im In- oder Ausland die Notwendigkeit frühzeitiger kollaborativer Planungsprozesse auf. Da das grösste Potenzial in diesem Bereich (mit der Nutzung von Biomasse-Energie mit CCS, KVA mit CCS oder auch DACCS) liegt, besteht zudem eine Abhängigkeit vom Ausland für die Speicherung von CO₂. Hier könnte sich auch eine Situation ergeben, in der die Nachfrage nach Speicherkapazitäten aufgrund von Netto-Null-Zielen in verschiedenen Ländern zügig zunimmt und diese in der Folge für Stadt oder Kanton Zürich nicht sichergestellt werden können. Nur eine frühzeitige systematische Auseinandersetzung, welche die in einen solchen Prozess ggf. eingebundenen Akteure im Rahmen der Politikplanung einbindet, kann hier mehr Planungssicherheit geben.

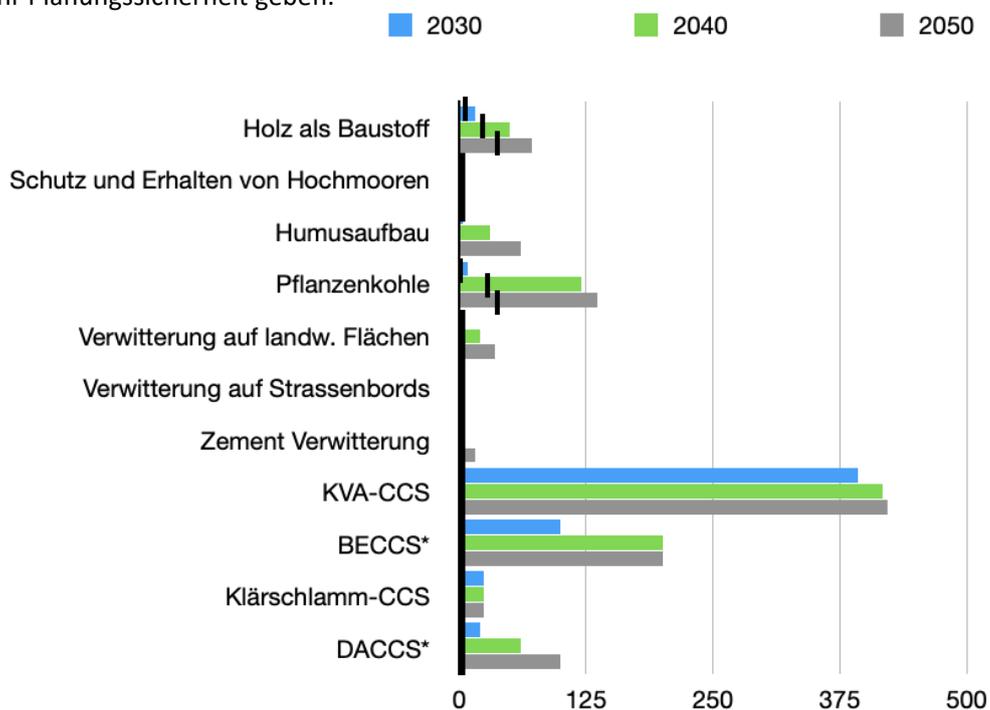


Abbildung 3: Grössenordnung der im optimistischen Szenario (farbig) oder pessimistischen Szenario (schwarze Begrenzungsstriche) für den Kanton Zürich (inkl. Stadt) projizierten Potenziale der analysierten Ansätze zur CO₂-Entfernung (in 1000 tCO₂/a).

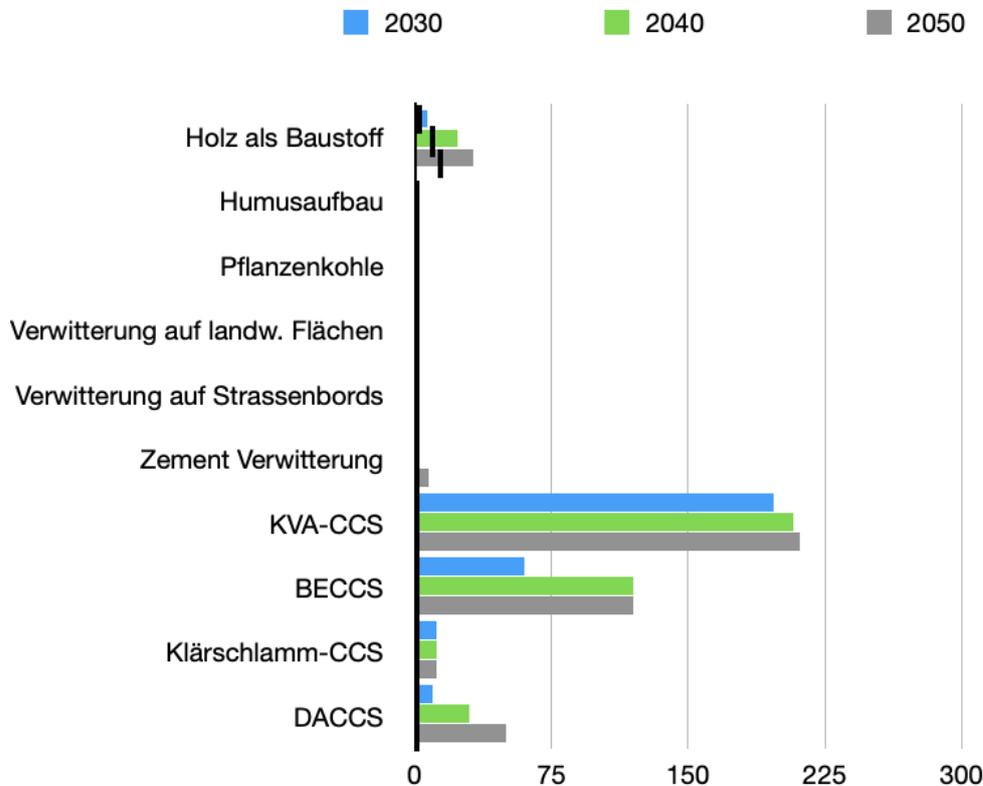


Abbildung 4: Grössenordnung der im optimistischen Szenario (farbig) oder pessimistischen Szenario (schwarze Begrenzungsstriche) für die Stadt Zürich projizierten Potenziale der analysierten Ansätze zur CO₂-Entfernung (in 1000 tCO₂/a).

Die Grössenordnungen der mit den verschiedenen Ansätzen erreichbaren Menge an CO₂-Entfernung sind also sehr unterschiedlich (s. Abbildung 3), wobei die grössten Potenziale (mit Abstand) bei der Kombination von CCS mit der Nutzung von Biomasse für Energie oder der Verwertung von Abfällen liegt, gefolgt von der Anwendung von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft, der Nutzung von Holz als Baumaterial und dem langfristigen Aufbau von Humus in landwirtschaftlichen Böden.

Es bleiben aber auch in Bezug auf die Potenziale wichtige Fragen offen, und ohne eine äusserst proaktive Planung und Kooperation zwischen Stadt, Kanton und Bund sowie internationalen Akteuren fallen gewisse Potenziale völlig weg. Offene Fragen sind also auch:

- Wo soll die öffentliche Hand eine führende, koordinierende, kontrollierende, finanzierende oder marktschaffende Rolle einnehmen?
- Wie gestaltet sich der Austausch mit anderen schweizerischen und internationalen Entitäten?
- Wo können der Kanton und die Stadt ansetzen, um lokales Knowhow aufzubauen und zentrale Akteure einzubinden?

9. Fazit und Ausblick zu NETs

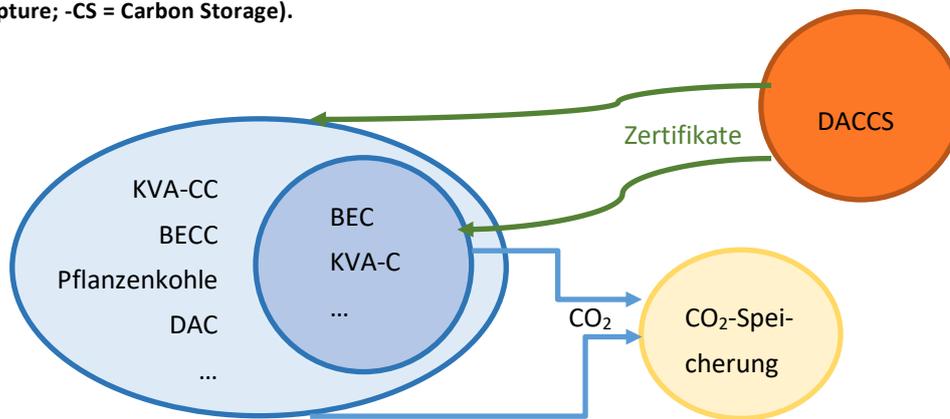
Die Untersuchung der Potenziale und Kosten negativer Emissionen im Kontext einer Zürcher Netto-Null-Emissionszielsetzung zeigt auf, wie stark solche Massnahmen von den verschiedenen Sektoren abhängig sind. Zudem zeigt sich, dass auch innerhalb eines Sektors verschiedene NETs-Ansätze eine separate Analyse erfordern.

Insgesamt zeigt sich, dass es sowohl auf Kantons- als auch auf Stadtebene ein gewisses Potenzial für den Einsatz verschiedener NETs gibt, dieses Potenzial ist jedoch bescheidener als die Emissionsminderungen, die in ähnlichen Bereichen und teilweise in Synergie erzielt werden können. Innerhalb von städtischen Regionen sind die biologischen Senkenpotenziale deutlich eingeschränkt. Doch auch im Kanton zeigen sich starke Einschränkungen, welche darauf hindeuten, dass ein Einsatz von NETs zwar anzustreben ist, jedoch zur Erreichung von Netto-Null nur eine sehr geringe verbleibende Emissionsmenge kompensieren könnte. Zentral ist daher, dass wirkungsvolle Massnahmen zur möglichst vollständigen Emissionsminderung zügig vorangetrieben werden.

Bei allen NETs bestehen aufgrund fehlender Umsetzungserfahrung grosse Unsicherheiten in Bezug auf deren Effektivität, mögliche Nebeneffekte sowie die zu erwartenden Kosten. Es gibt daher erheblichen Forschungsbedarf, bevor ein zügiger Ausbau von NETs in Angriff genommen werden kann. Umgekehrt bietet sich dadurch auch eine Chance für die Region Zürich als proaktiver Akteur in der angewandten Forschung, Entwicklung und Pilotierung (inklusive der Pilotierung verschiedener Anreizmechanismen) gewisser NETs, die internationalen Entwicklungen voranzubringen. Dabei kann im Zürcher Kontext auf eine engagierte Forschungs- und privatwirtschaftliche Akteurslandschaft zurückgegriffen werden. Diese Akteure können in transdisziplinären Projekten zu den nächsten Entwicklungsschritten mobilisiert werden.

Zumeist fehlen jegliche Anreize für privatwirtschaftliche Akteure, sich mit allfälligen NETs auseinander zu setzen; dies scheint insbesondere bei Ansätzen problematisch, welche eindeutig im privaten Sektor zu verorten sind. Bei einer ausländischen Speicherung durch CCS stellt sich auch die Frage nach derer Planung und der notwendigen internationalen Kooperation, wobei möglicherweise die Regeln im Kontext des internationalen Transfers von Kompensationszertifikaten (s. folgender Teil II) eine potenziell wichtige Rolle spielen könnten. Das Potenzial für ein Offsetting mit NETs scheint zwar in der näheren Zukunft ungewiss, langfristig könnte dessen Bedeutung jedoch weltweit dramatisch zunehmen, sofern Klimaziele effektiv umgesetzt werden. Hier könnten demnach Pilotversuche für bilaterale Kooperation unternommen werden, welche gemeinsam mit dem Bund und KliK vorangetrieben werden könnten.

Abbildung 5: Eine denkbare Kombination von lokalen (dunkelblau; z.B. in der Stadt), regionalen (hellblau; z.B. im Kanton), ausserkantonalen (gelb) und internationalen (orange) Massnahmen zur effektiven Mobilisierung von CO₂-Entfernungspotentialen inkl. durch Zukauf von Zertifikaten (z.B. aus DACCS Anlagen). (BEC = Bioenergie mit Carbon Capture; KVA-C = Kehrrichtverwertungsanlagen mit Carbon Capture; DAC = Direct Air Capture; -CS = Carbon Storage).



Abschliessend ist besonders hervorzuheben, dass für die Umsetzung der diskutierten Massnahmen auf umwelttechnisch belastbare und wirtschaftlich umsetzbare Art und Weise ein frühzeitiger Dialog mit den Stakeholdern und damit einhergehendes gemeinsames Lernen erforderlich sind. So sollten Entscheidungsträger der öffentlichen Hand, privatwirtschaftliche Akteure und Forschende in einen kontinuierlichen Dialog und Lernprozess eingebunden werden. Andererseits ist auch ein Aufbau von Vertrauen und Unterstützung in der Bevölkerung wohl eine Grundvoraussetzung für viele Massnahmen. Dafür ist kontinuierlicher offener Dialog mit der Bevölkerung entscheidend, um diese in den Lern- und Entscheidungsprozess einzubinden.

Anhang Teil 1

Tabelle A1: Grössenordnungen von Kosten und Potenzialen diskutierter CO₂-Entfernungsansätze in den untersuchten Sektoren in der Stadt und im Kanton (inkl. Stadt) (Teil 1)

Massnahme		Anrechnung der zunehmenden schweizweiten Holzbestände	Nutzung von Holz als Baustoff			Schutz und Erhalten von bestehenden Hochmooren			Wiedervernässung organischer Böden ⁱⁱⁱ			Humusaufbau			Pflanzenkohle							
Technisches Potenzial Stand heute	Stadt	0 (in Kanton & Stadt); ggf. Anrechnung der in anderen Kantonen tendenziell zunehmenden Holzbestände	78.000 tCO ₂ /a			-			Unklar: Flächen mit organischen Böden, welche sich langfristig für eine Renaturierung zu Hochmoor-Zielvegetation eignen; Jahrzehnte bis Jahrhundertelange Dauer des Aufbaus organischer Böden			Kein heute bestätigtes Potenzial; Forschung und Pilotprojekte könnten ein Potenzial im Kanton in der Grössenordnung von 75'000 tCO ₂ über 20 Jahre feststellen			Kanton Total 55.000-330.000 tCO ₂ verteilt über 20-50 Jahre davon Stadt: 550-3.300 tCO ₂							
	Kanton		170.000 tCO ₂ /a			50 tCO ₂ /a																
Limitierende Faktoren		Abnehmende Waldfläche im Flachland; ggf. Anrechnung Wälder anderer Kantone (nach Einwohnerzahl)	Bautechnische Möglichkeiten und Adaption der Holzbauweise			Verbleibende erhaltene Hochmoorflächen			Landwirtschaftliche Produktion; Flächen; Planungsdauer für Renaturierungsprojekte, Verlust von Fruchtfolgeflächen (FFF)			Trade-off mit der Wirtschaftlichkeit; Aufbau dauert Jahrzehnte; reversibel bei veränderter Bearbeitung			Graduelle Aufskalierung über Pilotversuche							
Zeithorizont		2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050			
Potenzial (tausend Tonnen CO ₂ /a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	1	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.17	0.25			
		Kanton	0	0	0	5	16	24	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	1.5	17	25			
Kosten (CHF / tCO ₂)	optimistisch	Stadt	60	30	0	7	23	32	0	0	0	0	0 ⁱⁱ	0 ⁱⁱ	0 ⁱⁱ	0.03	0.3	0.6	0.09	0.12	0.136	
		Kanton	230	115	0	16	50	72	0.05	0.05	0.05	0	0 ⁱⁱ	0 ⁱⁱ	3	30	60	8.5	120	136		
Kosten (CHF / tCO ₂)	pessimistisch		0**	0**	0**	50	50	50	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	20	10	0	30	20	10
	optimistisch		0**	0**	0**	<0*	<0*	<0*	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	0 ⁱ	20	10	0	30	20	10

* Holzbauweise kann preisgünstiger als Alternativen sein, das optimistische Szenario geht daher von negativen Minderungskosten aus.

** Das Anrechnen ausserkantonaler Senkenleistungen könnte prinzipiell mit einer finanziellen Entschädigung verbunden werden.

ⁱ Keine senken-spezifischen Kosten identifizierbar.

ⁱⁱ Senkenpotenziale von der Flächeneignung für eine allfällige weitere Wiedervernässung organischer Böden mit Hochmoor-Zielvegetation abhängig (laufende Überarbeitung durch das Amt für Naturschutz).

ⁱⁱⁱ Sehr grosses Verminderungspotenzial (vgl. Dekarbonisierungsbericht - Füssler et al. 2020); das Senkenpotenzial ist demgegenüber jedoch vernachlässigbar und mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Tabelle A2: Grössenordnungen von Kosten und Potenzialen diskutierter CO₂-Entfernungsansätze in den untersuchten Sektoren in der Stadt und im Kanton (inkl. Stadt) (Teil 2)

Massnahme			Mineral-Ausbringung auf Landwirtschaftsflächen			Mineral-Ausbringung auf Strassenbords, Grünstreifen und Flachdächer			Verwitterung von Zement in Reaktoren			Biomasse-Kraftwerk mit CCS			KVA mit CCS ^{##}			Klärschlamm-CCS			DACCS		
Technisches Potenzial Stand heute	Stadt		350 tCO ₂ /a			50 tCO ₂ /a			Heute null; bei proof of concept Kanton max. 15.000 tCO ₂ /a			120.000 tCO ₂ /a [#] 200.000 tCO ₂ /a [#]			167.000 tCO ₂ /a* 345.000 tCO ₂ /a)			12.000 tCO ₂ /a* 24.000 tCO ₂ /a*			75.000 tCO ₂ /a* 260.000 tCO ₂ /a*		
	Kanton		35.000 tCO ₂ /a			5.000 tCO ₂ /a																	
Limitierende Faktoren			Eignung auf verschiedenen Böden und Kulturen; logistische Herausforderung bei grossen Mengen; Adoptionsrate der Landwirte			Logistische Herausforderung bei grossen Mengen			Verfügbarkeit von CO ₂ , Zement, Machbarkeit der Reaktoren und Nutzbarkeit des Recycling-Zementes			Menge an Energieholz (Trade-off mit weiteren Nutzungen von Holz für Senken), Transport- bzw. Speichermöglichkeiten			Transport- bzw. Speicherkapazität			Technische Möglichkeiten der Abscheidung und Klärschlamm-mengen			Strom- und Wärmebedarf (für Standortwahl ist letzteres Ausschlag gebend)		
Zeithorizont			2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Potential (tausend Tonnen CO ₂ /a)	pessimistisch	Stadt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kanton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
Kosten (CHF / tCO ₂)	optimistisch	Stadt	0.035	0.2	0.35	0	0.02	0.03	0.25	2.5	7.5	60	120	120	197	208	211	12	12	12	10	30	50
		Kanton	3.5	20	35	0.5	2	3	0.5	5	15	100	200	200	393	417	422	24	24	24	20	60	100
Kosten (CHF / tCO ₂)	pessimistisch		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	800	700	450	800	700	450
			100	100	100	100	100	100	150	100	80	175	175	175	175	175	175	175	175	175	250	120	100

[#] Ohne inländische Speicherkapazität und ohne CO₂-Pipeline für ausländische Speicherung liegt die transportierbare CO₂-Menge möglicherweise unter dem technischen Minderungspotenzial für KVA-CCS, Klärschlamm-CCS, BECCS und DACCS zusammengenommen (möglicherweise bei einer Mio Tonnen CO₂, was etwa 100 Lastwagen täglich entspräche).

^{##} Das gesamte Minderungspotenzial (Senke und Emissionsminderung) von KVA-CCS wäre doppelt so gross wie das CO₂-Entfernungspotenzial allein (aufgrund der Emissionsminderung, welche dem fossilen Anteil im Abfall entspräche).

Tabelle A3: Übersicht über die befragten Expertinnen und Experten

Name	Institution
Christoph Abegg	Kanton Zürich, Baudirektion, Tiefbauamt
Francois Bouquet	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur
Marco Ghelfi	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Sonja Keel	Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung
Leo Simon Morf	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Konrad Noetzi	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur
Kurt Nyffenegger	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Markus Steger	Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Landschaft und Natur
Daniel Widmer	Strickhof, Ressourcenschutz und Düngung

Das Autorenteam dankt den Expertinnen und Experten für ihre wertvollen Beiträge und Informationen.

Teil 2: Rolle des Handels mit Treibhausgas-Zertifikaten

10. Einleitung

Das Konzept des Treibhausgas (THG)-Zertifikatehandels erlaubt es Akteuren, durch Zahlungen zur Finanzierung von THG-mindernden oder THG-speichernden Investitionen eigene Emissionen zu kompensieren. Dies kann z.B. durch den Bau und Betrieb von Biogasanlagen in Entwicklungsländern geschehen. Dafür braucht es ein geeignetes Regelwerk und eine Buchhaltung für THG-Zertifikate. Damit können Akteure durch den Kauf solcher Zertifikate Minderungsaktivitäten bei Dritten auslösen und durch den Transfer der Minderungsleistungen ihre eigenen Emissionen ausgleichen resp. kompensieren. Es gibt Zertifikatssysteme für den internationalen Handel wie auch für den Handel innerhalb der Schweiz. Zertifikate können aus Emissionsreduktionen (z.B. Nutzung von Biogas) wie auch CO₂-Senkenleistungen (z.B. technische Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂) stammen.

Ein solches Instrument könnte auch für den Kanton oder die Stadt Zürich auf dem Weg zu Netto-Null eine Rolle spielen. Insbesondere dürften mittelfristig internationale Zertifikatsmärkte eine wichtige Voraussetzung bilden für die Möglichkeit, Negativemissions-Zertifikate aus dem Ausland zu importieren, um Restemissionen zu kompensieren.

Im Folgenden werden die wichtigsten Formen des Zertifikatehandels vorgestellt und diskutiert. Kapitel 11 beschreibt die Rolle internationaler Zertifikatsmärkte unter dem bisherigen Kyoto Protokoll und dem neuen Abkommen von Paris, Kapitel 12 beleuchtet die Rolle von Zertifikatsmärkten für das Entstehen eines internationalen Marktes für Negativemissionen, Kapitel 13 beschreibt die Rolle von nationalen Kompensationsprojekten, welche durch das CO₂-Gesetz des Bundes geregelt sind. Kapitel 14 zieht das Fazit und wagt einen Ausblick.

11. Rolle des internationalen Zertifikatehandels

11.1. Stand der Dinge heute, Engagement des Bundes in Artikel-6-Mechanismen

Vor- und Nachteile des Zertifikatehandels mit dem Ausland

Gemäss ökonomischer Theorie bringt die internationale Kooperation in der Reduktion von Treibhausgasemissionen über Kompensationsprojekte und einem internationalen Zertifikatehandels eine Reduktion der Kosten für eine bestimmte Emissionsreduktion. Dies, weil die Emissionsreduktion dort erfolgt, wo sie am günstigsten ist. Dies ist in der Regel in Entwicklungslän-

dern der Fall. In Industrieländern weisen die Technologien in der Regel bereits einen guten Effizienzstandard auf, weshalb zusätzliche Emissionsreduktionen teurer sind als in Entwicklungsländern, welche oft noch weniger effiziente Technologien einsetzen. Weiter sollten sich Industrieländer im Rahmen des Pariser Abkommens selbst zu sehr ambitionierten Minderungszielen verpflichten. Damit müssen sie aus eigenem Antrieb alle Möglichkeiten zur Minderung von Emissionen in Wirtschaft und Gesellschaft ausschöpfen. Damit besteht bei Industrieländern kein Potenzial mehr zu Minderungsleistungen, die darüber hinausgehen und damit zum Verkauf an ein anderes Land zur Verfügung stehen würden⁵⁸.

In der Praxis zeigen sich aber beträchtliche Schwierigkeiten in der Umsetzung und Nutzung dieses Marktprinzips, um tatsächlich wirksame und langfristig gesicherte Emissionsreduktionen zu erzielen. Wichtige Herausforderungen liegen in der Sicherstellung der Zusätzlichkeit von Minderungsaktivitäten («Additionalität») und in der Bestimmung der Referenzentwicklung («Baseline»). Diese werden weiter unten diskutiert.

Ein weiterer Nachteil im Kontext der raschen Dekarbonisierung liegt im «Lock-in Effekt». Durch die Möglichkeit, günstige Zertifikate aus dem Ausland zu erwerben und sich anrechnen zu lassen, investieren Akteure weiterhin in fossil betriebene Infrastruktur im Inland (z.B. Öl- statt Biomassekessel), da die Gesamtkosten tiefer sind. Diese fossile Infrastruktur hat dann eine gewisse Lebensdauer (z.B. rund 10-20 Jahre für Ölkessel), während denen die entsprechenden THG-Emissionen nicht vermieden werden, der sogenannte «Lock-in». So kann die Möglichkeit, günstige Zertifikate kaufen zu können, langfristige Investitionsentscheide beeinflussen, z.B. den Ersatz von fossilen durch fossile Heizsysteme begünstigen. Damit verlangsamt der Zertifikatehandel tendenziell die Geschwindigkeit der Dekarbonisierung im Käuferland.

Trotz dieser Nachteile und Herausforderungen kommt die Schweiz sowie Kanton und Stadt Zürich im Hinblick auf ein Netto-Null-Ziel mittelfristig kaum um die Verwendung von internationalen Zertifikatsmärkten für Negativemissionen herum, da das NETs-Potenzial in der Schweiz und im Kanton kaum ausreichen wird (siehe Teil 1) zur Kompensation der Restemissionen. Es besteht deshalb ein langfristiges Interesse am Aufbau von robusten und funktionierenden Zertifikatsmärkten.

Erfahrungen unter dem Kyoto Protokoll mit dem CDM

Das Kyoto-Protokoll von 1997 führte als flexible Mechanismen unter anderem den «Clean Development Mechanism» (CDM) zur Anrechnung von in Entwicklungsländern erreichten Minderungsleistungen in (westlichen) Käuferländern ein. Nach anfänglichen Startschwierigkeiten wurde CDM von den registrierten Projekten her ein eigentliches Erfolgsmodell, nachdem die

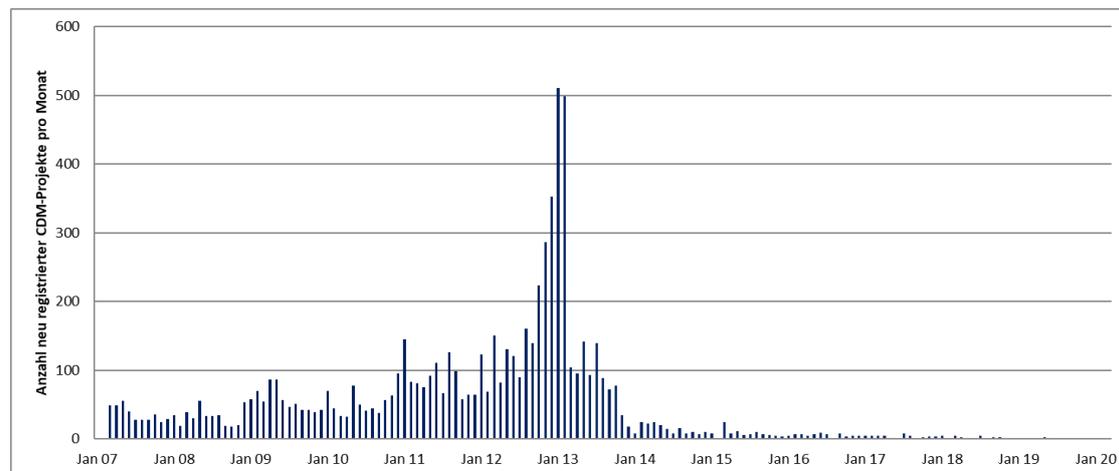
⁵⁸ Bei technischen Senkenleistungen kann aber von diesem Prinzip abgewichen werden (siehe Abschnitt 12)

Europäische Union ab 2005 die Anrechnung von Emissionsreduktionen aus CDM-Projekten für Anlagen mit Emissionsbeschränkungen unter EU-Emissionshandelssystem erlaubte.

Unter dem CDM wurden bis heute über 7000 Projekte in Entwicklungsländern registriert. Von diesen liegen über die Hälfte in China, weitere wichtige Länder resp. Regionen sind Indien, Südostasien und Lateinamerika. Diese Vielzahl an Projekten stärkte das Wissen über das Messen, Verifizieren und die Berichterstattung von THG-Minderungen in den Gastländern beträchtlich. Dieses Wissen hilft den Ländern nun auch in der Umsetzung ihrer eigenen Ziele unter dem neuen Pariser Abkommen.

Als ab Ende 2012 die EU die Nutzung von CDM-Minderungsleistungen im EU-Emissionshandelssystem praktisch ausschloss, brachen die Zertifikatspreise zusammen und es wurden seither viel weniger CDM-Projekte registriert (Abbildung 6).

Abbildung 6: Rückgang des CDM-Zertifikatsmarktes nach 2012



Mit dem weitgehenden Bann der Nutzung von Zertifikaten von neuen CDM-Projekten im EU-Emissionshandelssystem Ende 2012 versiegten die Neuregistrierungen im CDM.

Quelle Daten: UNEP-DTU CDM Pipeline Analysis and Database vom 1. 4. 2020 <http://www.cdmpipeline.org/>

Das Problem der Additionalität und die Bestimmung des Referenzszenarios

Erfahrungen mit dem Clean Development Mechanism in Compliance-Märkten

CDM-Projekte müssen gemäss den Regeln der UN-Klimakonvention nachweisen, dass sie ohne die zusätzliche Unterstützung durch den CDM nicht durchgeführt worden wären (Zusätzlichkeit

oder «Additionalität»). Dies ist in der Praxis sehr schwierig nachzuweisen, da die angewendeten Wirtschaftlichkeits- oder Hindernisanalysen in der Regel grosse Unsicherheiten aufweisen und durch Dritte kaum objektiv überprüfbar sind. Weiter ist die Bestimmung der Referenzentwicklung («Baseline») oft mit grossen Unsicherheiten behaftet, so dass das Risiko einer Überschätzung der Minderungsleistung besteht.

Eine Untersuchung für die Europäische Kommission (Cames et al. 2016) kam zu Schluss, dass der CDM grundlegende Probleme mit der Umweltintegrität hat: Gemäss der Studie weisen 85% der Projekte eine tiefe Wahrscheinlichkeit auf, dass die resultierenden Minderungsleistungen zusätzlich und nicht überschätzt sind. Nur bei 2% der Projekte (oder 7% der 2013-2020 erwarteten Minderungsleistungen des CDM) wurde die Wahrscheinlichkeit als hoch eingeschätzt, dass die Minderungsleistungen zusätzlich sind und nicht überschätzt werden.

Ein Beispiel für die fehlende Additionalität liegt im Sektor der Erneuerbaren Energien in China. Hier sahen die staatlichen 5-Jahrespläne einen raschen Ausbau der Kapazität an Windenergieanlagen vor, welcher mit Hilfe staatlicher Hilfen umgehend umgesetzt wurde. Gleichzeitig wurde ein Grossteil der chinesischen Wind-Projekte auch unter dem CDM registriert und die entsprechenden Minderungsleistungen vor allem in das EU-Emissionshandelssystem verkauft. Gemäss den Regeln des CDM konnten die Wind-Entwickler für jedes CDM-Projekt nachweisen, dass das Projekt ohne die Förderung durch den CDM unwirtschaftlich war und nicht umgesetzt worden wäre. Der finanzielle Beitrag aus dem CDM für Windprojekte ist aber sehr klein (rund 2 Prozentpunkte des Internal Rate of Return). Dieser kleine finanzielle Beitrag dürfte zwar dem Zubau etwas geholfen haben, es ist jedoch wenig wahrscheinlich, dass China seinen 5-Jahresplan zum Ausbau der Windkapazität nicht auch ohne CDM umgesetzt hätte. Die resultierenden CDM-Zertifikate wurden dann in beträchtlichem Umfang etwa von Kohlekraftwerkbetreibern und anderen emissionsintensiven Industrien verwendet, um ihr Emissions-Cap auch ohne eigene Emissionsreduktionen zu erreichen. Dies illustriert, wie der Handel mit nicht-zusätzlichen Emissionszertifikaten zu einem Anstieg der globalen Netto-Emissionen führt.

Eine eher gute Additionalität weisen im allgemeinen Projekte auf, bei denen Methan- oder Lachgas-Emissionen reduziert werden und bei denen durch das Projekt nur Kosten und keine neuen Einnahmequellen entstehen, z.B. den Einbau von Gasfackeln in Deponien ohne das Produzieren von Elektrizität. Solche Projekttypen bilden aber nur einen kleineren Anteil an der Gesamtzahl der CDM Projekte.

Weitere Standards des Zertifikatehandels

Neben den Mechanismen unter dem Kyoto-Protokoll (CDM, Joint Implementation und International Emissions Trading) gibt es eine Reihe weiterer internationaler Programme, die Zertifikate

generieren, welche einerseits für die Erfüllung nationaler gesetzlicher Vorgaben (z.B. in regionalen Emissionshandelssystemen) oder aber für die freiwillige Kompensation, etwa von Flugreisen für Firmen und Private, erlauben (Kollmuss und Füssler, 2015).

Wichtige Standards auf privater Basis sind weiter:

- VCS Program (früher VCS, heute Verra, rund 1600 registrierte Projekte)
- Gold Standard (emittiert eigene Zertifikate oder stellt das Gold Standard Label für CDM-Zertifikate von besonders nachhaltigen CDM-Projekten aus, rund 700 registrierte Projekte)

Diese internationalen Standards arbeiten vom methodischen Ansatz her ähnlich wie der CDM und weisen auch ähnlich gelagerte Probleme bezüglich Additionalität und Überschätzung von Emissionsreduktionen auf, wenn auch der Gold Standard generell als etwas stringenter gilt.

Die Rolle von Projekttypen in der Additionalität

Vereinfacht gesagt sind bei einem festen Zertifikatspreis nicht alle Projekttypen gleich problematisch bezüglich Additionalität. Der finanzielle Beitrag aus dem Verkauf von Zertifikaten ist in der Regel besser für Projekte zur Reduktion von Methan- oder Lachgas-Emissionen. Dies auch wegen der höheren Klimawirkung dieser Gase («Global Warming Potential») und der entsprechend höheren finanziellen Beiträge aus dem Verkauf von Bescheinigungen für diese Projekte (siehe auch 13.2). Weiter ist hier der Verkauf von Zertifikaten hier oft die einzige Erlösquelle, was den Nachweis der Additionalität vereinfacht.

Tabelle 6: Vereinfachte Übersicht zur Additionalität von Projekttypen

Projekttypen mit hohem Risiko der Nicht-Additionalität	Projekttypen mit mittlerem bis niedrigem Risiko der Nicht-Additionalität
Stromproduktion aus Wind	Nutzung von biogenen Abfällen durch Methanisierung
Stromproduktion aus Wasserkraft	Deponiegasnutzung
Abwärmenutzung	Lachgasreduktion in Industrieprozessen
Brennstoffwechsel von Kohle oder Öl auf Erdgas	Technische Negativemissionstechnologien

Projekte, welche die Emission von nicht- CO₂-Gasen wie Lachgas oder Methan reduzieren sowie technische Negativemissionstechnologien, haben tendenziell weniger Probleme mit der Additionalität als CO₂-reduzierende Projekte.

Quelle: Adaptiert von Tabelle 1-1 in Cames et al. 2016

Das Pariser Abkommen und die Marktmechanismen unter Artikel 6.2 und 6.4

Mit dem Pariser Abkommen, dessen Regelungen ab 2020 greifen, haben sich alle⁵⁹ Länder, inklusive der Entwicklungsländer, eigene Klimaziele gesetzt, die sogenannten Nationally Determined Contributions (NDCs). Einerseits besteht damit zum ersten Mal ein global verbindlicher Rahmen zur Reduktion der THG-Emissionen, andererseits sind die in den NDC gesetzten Ziele der meisten Länder bei weitem ungenügend, um das übergeordnete Ziel des Pariser Abkommens, die Erderwärmung auf 1.5/2°C zu beschränken und in der zweiten Hälfte die globalen Netto-Emissionen auf null zu reduzieren, zu erreichen (UNEP Gap Report 2019). Es ist deshalb sehr wichtig, dass der im Pariser Abkommen eingebaute Prozess der schrittweisen Erhöhung der Ambition der Länderziele in den NDCs («ratcheting up») auch tatsächlich greift und nicht durch Marktmechanismen geschwächt, sondern gestärkt wird.

Marktmechanismen unter Artikel 6.2 und 6.4

Das Abkommen von Paris definiert ein neues Regelwerk, darunter die Marktmechanismen unter Artikel 6.2 und 6.4. Die Artikel erlauben die Kooperation von Staaten und die internationale Übertragung von Zertifikaten aus Minderungsleistungen (Internationally Transferred Mitigation Outcomes, «ITMOs» oder Emissionsreduktionen) mit dem Ziel, in einem Gastland eine Minderungsaktivität durchzuführen und die entstehenden Zertifikate international zu übertragen, so dass das Käuferland sein Ziel des NDC dank dieser Minderungsleistung erreicht. Weiter sollte Artikel 6 generell das Ambitionsniveau steigern. Die Staatengemeinschaft konnte sich aber auch an der Klimakonferenz in Madrid (COP 25) noch nicht auf das detaillierte Regelwerk zur Umsetzung des Artikels 6 einigen.

Ein wichtiger Grundsatz des Artikels 6 liegt im Ausschluss der Doppelzählung. Im Wesentlichen heisst das, dass eine bestimmte Minderungsleistung, welche sich das Käuferland zur Erreichung seines NDC anrechnen lassen will, das Gastland nicht mehr anrechnen lassen darf. Um dies auszuschliessen, braucht es eine Art doppelte Buchhaltung solcher internationalen Transfers mit entsprechenden Einträgen in den nationalen THG-Budgets («Corresponding Adjustments»). Unter dem CDM war dies noch nicht notwendig, da die beteiligten Entwicklungsländer sich keine internationalen Reduktionsziele gesetzt hatten.

In ihren offiziellen nationalen Verpflichtungen zu Klimaaktivitäten (NDC) sind die meisten industrialisierten Länder sehr zurückhaltend in ihren Plänen, internationale Marktmechanismen zu nutzen. Nur sehr wenige Länder haben explizit ihre Intention kommuniziert, Marktmechanismen zur Erreichung ihres NDC nutzen zu wollen, darunter die Schweiz. In der EU könnte dies zum Teil auch Verhandlungstaktik sein, da die Detailregelungen von Artikel 6 an den Klima-

⁵⁹ Mit Ausnahme der USA

verhandlungen seit Jahren sehr kontrovers diskutiert werden und die EU auf stringente und robusten Regelungen pocht, es aber nicht klar ist, ob sich die internationale Gemeinschaft darauf einigen kann. Auf einer technischen Ebene, z.B. der methodischen Fragen, sind aber einzelne Länder wie Deutschland oder Schweden relativ aktiv, so dass damit gerechnet werden könnte, dass bei der Verfügbarkeit robuster Detailregelungen mehr industrialisierte Länder zu Käufern von internationalen Zertifikaten werden könnten, um ihre NDC-Ziele erreichen zu können.

Auch auf Seite möglicher Verkäuferstaaten besteht zurzeit eine gewisse Zurückhaltung, sich in Artikel-6-Märkten zu engagieren, da die Detailregelungen noch nicht beschlossen sind und da sie das Risiko scheuen, zu viel Minderungsleistung zu verkaufen und deshalb nicht mehr in der Lage zu sein, ihr eigenes Reduktionsziel im NDC zu erreichen (overselling risk). Vielen potentiellen Gastländern fehlen auch die institutionellen Ressourcen, um sich am Markt beteiligen zu können, da der Artikel 6 von den Gastländern mehr verlangt als etwa der CDM.

Pilotaktivitäten des Bundes und Auslandsziel 2030

Die Schweiz plant, ihr Treibhausgasreduktionsziel für 2030 teilweise mit Auslandsreduktionen zu erreichen. Der Bund hat mit der Stiftung Klimarappen der Treibstoffimporteure einen Vertrag geschlossen, um Minderungsaktivitäten unter Artikel 6 in Entwicklungsländern zu pilotieren und Erfahrungen zu sammeln. Die Nachfolgestiftung KliK bereitet sich vor, ab 2021 Zertifikate im Ausland zu erwerben, um einen Teil der CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Treibstoffe in der Schweiz zu kompensieren.

Die Schweiz spielt hier international eine Vorreiterrolle. Es gibt sonst kaum Staaten, welche konkrete Pläne zur Nutzung der Artikel-6-Mechanismen haben. Die EU schliesst die Nutzung zurzeit aus, was sich aber in Zukunft ändern könnte. Die Schweizer Pilotaktivitäten bieten eine gute Chance, robuste Artikel-6-Mechanismen in Zusammenarbeit mit Partnerländern zu entwickeln. Die Schweiz hat sich auch vorgenommen, solche Projekte nach hohen Massstäben bezüglich Umweltintegrität und generellen Nachhaltigkeitsstandards zu entwickeln. Zur Wahrung der Umweltintegrität gehört insbesondere die Sicherstellung der Additionalität, der Ausschluss von Doppelzählungen durch ein robustes nationales und internationales Accounting-System und der Verkauf von Zertifikaten aus Ländern, die ihre NDC-Zielwerte höher als ihre Business-as-usual-Emissionen setzen, und die deshalb keinen tatsächlichen Emissionsreduktionen entsprechen («Hot Air»).

Trotz der proaktiven Rolle der Schweiz ist zurzeit schwierig absehbar, wie schnell Zertifikate in einer gewissen Menge und hoher Qualität verfügbar sein werden. Der schleppende

Fortschritt der Verhandlungen, die geringe internationale Netto-Nachfrage⁶⁰ und die Mühe der Gastländer, die entsprechenden Prozeduren für Artikel-6-Projekte zeitnah zu implementieren, lassen auf einen langsamen Prozess schliessen.

Die relativ hohe Zahlungsbereitschaft am Markt, alimentiert aus dem Verkauf fossiler Treibstoffe, sollte aber der Schweiz mittelfristig erlauben, erfolgreich Minderungsaktivitäten unter Artikel 6 zu implementieren. Dies könnte auch ein Modell für weitere Staaten werden.

11.2. Potenzial und Kosten des internationalen Zertifikatehandels

Potenzial und Preise heutiger Zertifikate aus dem CDM

Heute kosten Zertifikate aus dem CDM inklusive Verifikation durch eine akkreditierte Prüfstelle und ausgestellt im CDM-Register der UNFCCC unter 30 Euro-Cents pro Tonne CO₂. Aus Sicht der Emissionen des Kantons Zürich oder der Stadt Zürich dürften zurzeit praktisch beliebige Mengen an Zertifikaten verfügbar sein (Warnecke et al. (2019) schätzen die Menge an verfügbaren Zertifikaten aus dem CDM auf über 4 Milliarden Tonnen CO₂eq. Direkt am Markt verfügbare Mengen liegen bei 0.6 bis 1 Milliarden Tonnen.)

Der Kauf dieser Zertifikate würde keine zukünftige Reduktionsleistung bedingen, sondern nur eine in der Vergangenheit erfolgte Reduktionsleistung bescheinigen, unter dem Vorbehalt, dass das entsprechende Projekt auch zusätzlich war respektive das Additionalitätskriterium erfüllt (siehe 11.1).

Potenzial und Preise zukünftiger internationale Zertifikate unter Artikel 6

Internationale Zertifikatsmärkte hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, seien es nachgefragte Volumen und Qualität der Zertifikate von Käuferseite, sei es die Verfügbarkeit von übertragbaren Minderungsleistungen und die institutionelle Kapazität, solche Transfers abzuwickeln, auf Seite der Verkäuferländer. Damit der Blick in die Zukunft nicht nur ein Blick in die Kristallkugel wird, werden wir uns im Folgenden auf ein einfaches Modell stützen und dies durch qualitative Betrachtungen ergänzen.

IETA-Studie zum ökonomischen Potenzial von Artikel 6

Eine der neueren Studien zum ökonomischen Potenzial von Artikel-6-Mechanismen wurde von der International Emissions Trading Association (IETA) in Zusammenarbeit mit der University of Maryland durchgeführt und unterstützt durch die Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC)

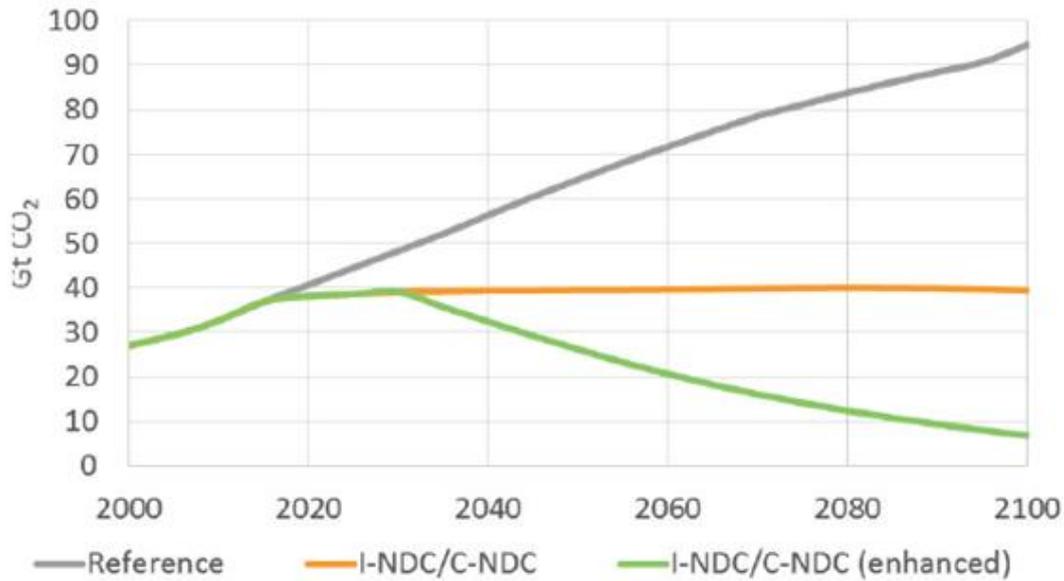
⁶⁰ Grundsätzlich ist eine neue Nachfrage nach internationalen Minderungszertifikaten aus CORSIA, dem Instrument der Flugindustrie zur Stabilisierung der Flugemissionen auf heutigem Niveau, zu erwarten. Aus heutiger Sicht steht dieser potentiellen Nachfrage aber ein Mehrfaches an unbenutzten alten Emissionsreduktionen aus dem CDM gegenüber, so dass kaum damit zu rechnen ist, dass CORSIA zusätzliche Emissionsreduktionen auslöst.

der Weltbank (IETA 2019). Die IETA ist eine Lobbyorganisation für Firmen, welche sich im Zertifikatshandel engagieren; man darf deshalb annehmen, dass die Studie das ökonomische Potenzial und die Preise kaum zu konservativ abschätzt.

Die Studie nimmt an, die Staaten erreichen ihre nationalen Minderungsziele gemäss den NDCs im Jahre 2030 und modelliert die Kosten der Minderungsaktivitäten in jedem Land individuell. Über alle Länder summiert lassen sich so die Gesamtkosten berechnen, um das 2030er Ziel gemäss NDCs zu erreichen. Mit der Nutzung der «cooperative approaches» unter Artikel 6 wird ein vollkommener offener Handel von Zertifikaten zwischen den Staaten angenommen. Staaten mit höheren Minderungskosten kaufen Zertifikate in Ländern mit einem grösseren Potenzial an Minderungsleistungen mit tiefen Kosten und lassen sich diese an die eigene Zielerreichung zum NDC anrechnen. Mit einem einfachen ökonomischen Modell bestimmt die Studie Minderungs-Grenzkosten in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage ohne weitere Hemmnisse für Investitionen wie Transaktionskosten sowie methodische und institutionelle Hürden (siehe Abschnitt 11.1) zu berücksichtigen.

Die Studie untersucht die Wirkung des internationalen Zertifikatshandels anhand von zwei unterschiedlich ambitionierten Absenkpfeilen der globalen CO₂-Emissionen:

- Zunächst untersucht die Studie nur eine Begrenzung der Emissionen (ohne weitergehende Dekarbonisierung) entsprechend den NDC-Zielen, welche sich die Staaten für 2030 gesetzt haben (orange Kurve in Abbildung 7, Pfad I-NDC/C-NDC). Diese 2030-Ziele werden danach bis 2100 gehalten und die absoluten Emissionen nicht weiter abgesenkt. Dies entspricht in keiner Art und Weise dem Ziel des Paris Agreements einer weitgehenden und raschen Dekarbonisierung.
- Ein ambitionierterer Absenkpfad «enhanced» (Grün in Abbildung 7) mit moderater Dekarbonisierung nach 2030 wird im übernächsten Abschnitt diskutiert.

Abbildung 7: Angenommene Szenarien der globalen CO₂-Emissionen in der IETA-Studie

Globale CO₂-Emissionen aus fossilen Treib- und Brennstoffen und industrieller Produktion in drei definierten Emissionspfaden in der IETA-Studie:

Grau – im Referenz-Szenario wird ein ungebremstes Wachstum der globalen THG-Emissionen bis 2100 ohne klimapolitische Minderungsmaßnahmen angenommen,

Orange – Begrenzung auf 2030 NDC-Ziele (I-NDC/C-NDC) sowie

Grün – «enhanced» Absenkpfad mit -34% in 2050 und -83% in 2100 im Vergleich zum gelben Szenario I-NDC/C-NDC.

Selbst das «enhanced» Szenario entspricht bei weitem nicht dem globalen Ziel des Pariser Abkommens.

Quelle: Abbildung 11 in IETA (2019)

Begrenzung, aber keine Dekarbonisierung: Zertifikate bringen global Kostenreduktion

Beim Pfad der Begrenzung der globalen CO₂-Emissionen auf 2030-NDC-Ziele (orange Kurve in Abbildung 7) unterscheidet die Studie zwei Szenarien:

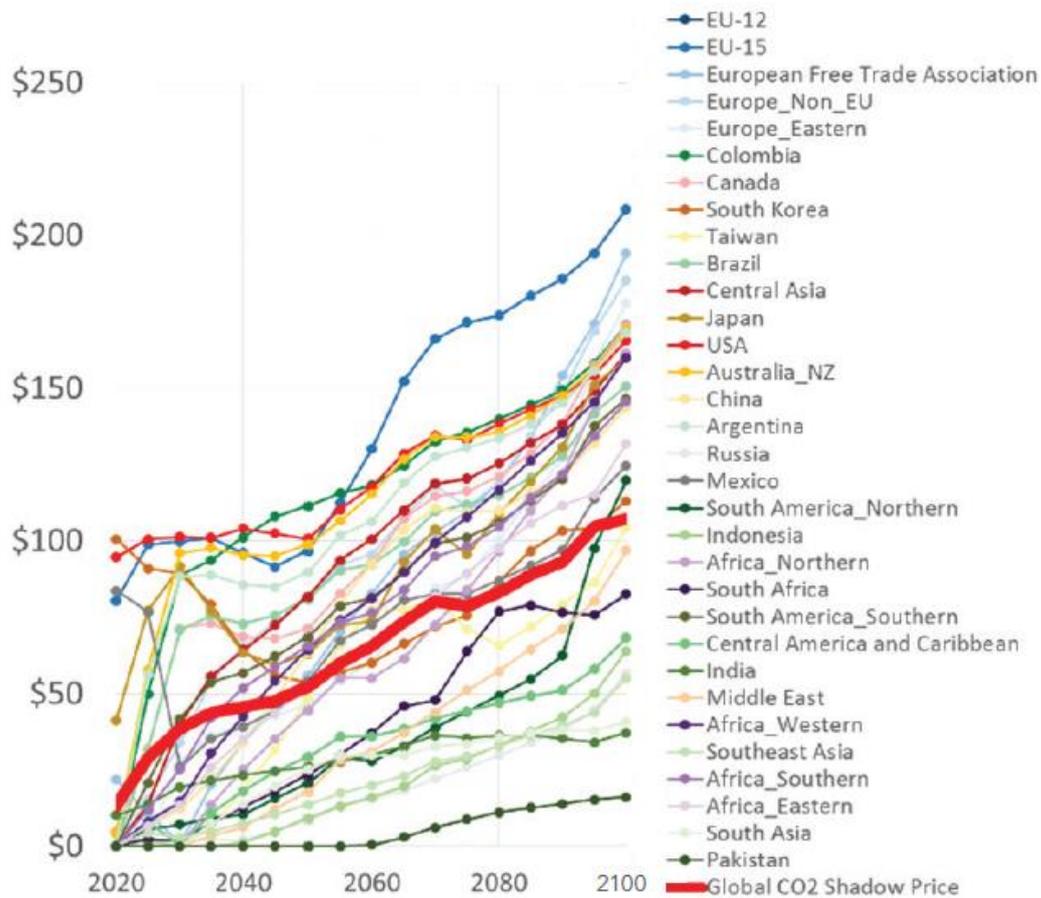
- **«Individuell»** In diesem Szenario erreichen alle Staaten ausschliesslich durch eigene Minderungsaktivitäten ihr 2030 NDC-Ziel individuell. Das Ziel wird bis 2100 gehalten und nicht weiter abgesenkt.
- **«Cooperative»**: In diesem Szenario erreichen alle Staaten ihr 2030 NDC-Ziel, nutzen aber den Zertifikatshandel («cooperative approaches») zur Kostenreduktion. Die resultierenden Emissionen sind gleich wie im Szenario «individuell» (orange Kurve in Abbildung 7).

Mit dem wenig ambitionierten Absenkepfad, welcher nach der Erreichung der 2030 NDC-Ziele nicht weiter reduziert, sind die Kosten⁶¹ für Minderungen in den einzelnen Staaten sehr unterschiedlich (siehe Abbildung 8). Dies liegt einerseits daran, dass die Grenzkosten in den Ländern unterschiedlich sind, andererseits sind die Ambitionsniveaus der NDC-Länderziele sehr unterschiedlich: in vielen Ländern sind die NDC-Ziele höher als die erwarteten Business-as-usual-Emissionen, womit diesen Ländern keine Kosten zur Implementation anfallen (CAT 2020). Damit ergibt sich auch ein beträchtliches theoretisches Potenzial für Kosteneinsparungen durch den internationalen Zertifikatshandel im Szenario «Cooperative», wo sich ein globaler Einheitspreis einstellt (dicke rote Kurve in Abbildung 8). So sind z.B. die Minderungskosten in 2030 in Europäischen Ländern mit gegen 100 USD/ t CO₂ mehr als doppelt so hoch wie der globale Einheitspreis, der im Modell unter 50 USD/ t CO₂ liegt.

In der IETA-Studie beläuft sich das Volumen des hypothetischen Zertifikatsmarktes (in C-NDC) in 2030 auf 167 Milliarden USD, wobei rund 4.3 Gt CO₂ pro Jahr international transferiert werden. Gemäss der Studie erlaubt es der internationale Zertifikatshandel, die globalen Kosten zur Erreichung der (nicht sehr ambitionierten) 2030 NDC-Ziele um mehr als die Hälfte zu reduzieren (auf rund 250 Milliarden USD pro Jahr), verglichen mit einem Ansatz, bei dem die Länder ihre Ziele individuell erreichen. Dies gilt unter der Annahme, dass ab 2030 die NDC-Ziele nicht weiter verschärft werden müssten. Damit fehlt jedoch ein essentieller Grundpfeiler des Pariser Abkommens.

⁶¹ Das ökonomische Modell mit seinen idealisierten Annahmen arbeitet mit sogenannten «Schattenpreisen». Tatsächliche Preise, um Minderungsleistungen auszulösen, können wesentlich höher sein. Andererseits gibt es auch in westlichen Ländern noch ein grosses Reduktionspotenzial mit negativen Kosten, zum Beispiel im Bereich Energieeffizienz, welches wegen nicht-monetären Hürden nicht realisiert wird.

Abbildung 8: Schattenpreise für Minderungsleistungen bei blosser Begrenzung der Emissionen auf 2030 NDC-Ziele



Dünne Linien: Schattenpreise für Minderungsleistungen zur Begrenzung der CO₂-Emissionen auf dem Niveau der NDC-Ziele für das Jahr 2030 Emissionen (orange Kurve in Abbildung 7) in den einzelnen Ländern ohne internationalen Zertifikatshandel (Szenario «Individuell»).

Dicke rote Linie: Globaler Schattenpreis unter vollständiger Nutzung des internationalen Zertifikatshandels (Szenario «Cooperative»).

Quelle: Abbildung 4-C in IETA (2019)

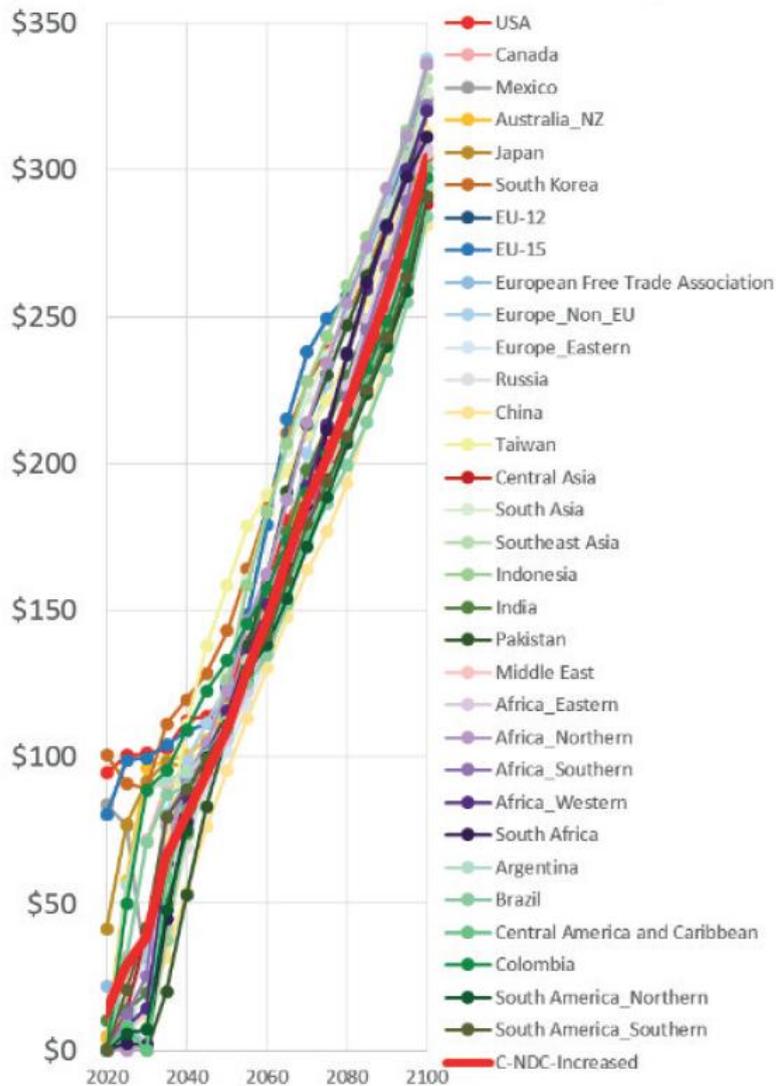
Mit nur moderater weltweiter Dekarbonisierung: globale Preisunterschiede verschwinden und Zertifikatshandel bringt wenig

Es scheint zurzeit keine neueren Studien zu geben, welche die Rolle des internationalen Zertifikatshandels unter einer weitgehenden Dekarbonisierung bis 2050 gemäss den Zielen des Pariser Abkommens untersuchen. Die IETA-Studie (2019) betrachtet jedoch neben der Stabilisie-

zung der THG-Emissionen auf dem Niveau der 2030 NDC-Ziele auch einen etwas ambitionierteren Absenkepfad (grüne Kurve in Abbildung 7). Dieser sieht vor, dass bis 2030 die NDC-Ziele der Länder erreicht werden, danach aber die globalen Emissionen weiter abgesenkt werden: um -34% in 2050 und -83% in 2100 im Vergleich zum Emissionspfad der blossen Begrenzung ab 2030 (orange Kurve in Abbildung 7). Es wird dabei angenommen, dass diese Absenkung parallel in Industrie- wie auch in Entwicklungsländern vorgenommen wird. Selbst dieses «enhanced» Szenario entspricht bei weitem nicht dem globalen Ziel des Pariser Abkommens.

Auch für diesen «enhanced» Absenkepfad berechnet die Studie die Schattenpreise in Szenarien ohne («Individuell») und mit der Nutzung des internationalen Zertifikatehandels («Cooperative»).

Abbildung 9: Schattenpreise für Minderungsleistungen bei moderater Dekarbonisierung



Dünne Linien: Schattenpreise für Minderungsleistungen zur moderaten Dekarbonisierung der CO₂-Emissionen (grüne Kurve in Abbildung 7) in den einzelnen Ländern ohne internationalen Zertifikatshandel (Szenario «Individuell»).
Dicke rote Linie: Globaler Schattenpreis unter vollständiger Nutzung des internationalen Zertifikatshandels (Szenario «Cooperative»).

Quelle: Abbildung 12-B in IETA (2019)

Mit einem Absenkpfad, der zumindest näher an den Vorgaben des Pariser Abkommens liegt, sind die resultierenden Schattenpreise (Abbildung 9) wesentlich höher als im blossen Begrenzungspfad (Abbildung 8). Gemäss den wenig ambitionierten NDC-Zielen liegen die individuellen Preise in verschiedenen Ländern noch relativ weit auseinander bis 2030. Danach konvergieren aber die Preise in allen Ländern sehr rasch zu einem relativ schmalen Preisband (schon ab

2040), da der stringenteren Ziele wegen alle Länder robuste Minderungsleistungen implementieren müssen. Der globale Schattenpreis erreicht über 300USD/tCO₂ im Jahre 2100⁶². Auch bei individueller Umsetzung ohne Zertifikatshandel bewegen sich die Schattenpreise in den einzelnen Ländern im Bereich von -15% bis +45% in 2050 und nur noch -5% bis +10% in 2100 um den globalen Schattenpreis. Mit geringeren Preisunterschieden zwischen den Ländern schwindet aber auch das Potenzial für Kostenreduktionen durch den internationalen Zertifikatshandel.

Bei einem noch ambitionierteren Absenkpfad wie ihn das Pariser Abkommen fordert, sind die zu erwartenden Schattenpreise noch höher und dürften auch schneller konvergieren. Damit dürfte das Kosteneinsparungspotenzial des internationalen Zertifikathandels noch weiter sinken.

Das Konvertieren der Preise ist vor allem zu erwarten, wenn Industrie- und Entwicklungsländer gleichzeitig Dekarbonisieren, wie in der Modellierung angenommen. Würde man sich jedoch vorstellen, dass gewisse Länder einen viel langsameren Dekarbonisierungspfad wählen, dann dürften auch ihre Minderungskosten während vieler Jahren noch wesentlich tiefer liegen, als in Ländern mit ambitionierten Absenkpfeilen. Dieser Preisunterschied könnte theoretisch einen Zertifikatshandel interessant machen. Käuferländer dürften aber nicht daran interessiert sein, Zertifikate aus Ländern zu kaufen, die wenig ambitionierte Reduktionsziele haben, da damit auch gesamtwirtschaftlich kein Nutzen entsteht.

11.3. Zwischenfazit zur Rolle des internationalen Zertifikatshandels

Je ambitionierter der globale Absenkpfad, umso geringer die Vorteile durch den internationalen Zertifikatshandel. Unter einem moderaten Dekarbonisierungsszenario zeigt die IETA-Studie (2019) das grösste Kostensenkungspotenzial zu Beginn des betrachteten Zeitraums, also 2020-2040.

Es ist jedoch schwierig zu sagen, welcher Teil dieses Einsparpotenzials aus den verschiedenen Grenzkosten von Minderungsleistungen in den verschiedenen Ländern stammt und welcher Teil aus den Unterschieden im Ambitionsniveau der 2030 NDC-Ziele (siehe z.B. CAT 2020). Stammt der Effekt aus Unterschieden im Ambitionsniveau, würde dies nicht einer ökonomischen Optimierung entsprechen, sondern setzt lediglich Anreize für Länder, sich weniger ambitionierte NDC-Ziele zu setzen, da sie dann ein grösseres Potenzial an «überschüssigen» Minderungsleistungen haben und finanziell vermehrt vom Zertifikatshandel profitieren können. Damit der Zertifikatshandel nicht zu einem «Race-to-the-bottom» für Verkäuferländer führt und

⁶² Hinweis: Solche Schattenpreise aus ökonomischen Modellen sind mit Vorsicht zu interpretieren, da die Modelle naturgemäss auf der Basis von starken Vereinfachungen und weitgehenden Annahmen arbeiten und in der Regel in ihrer Aussagekraft abnehmen, je weiter man sich von heutigen oder historischen Zuständen entfernt und je ambitionierter die betrachteten Absenkpfade werden.

tatsächlich zu einem Anheben der Ambitionsniveaus beiträgt (wie es auch der Text des Artikel 6 verlangt), sind weitreichende Vorkehrungen durch Käufer- wie Verkäuferländer wie etwa die Einführung strikter Eignungskriterien notwendig (Füssler et al. 2019).

Von der Menge her dürften Schweizer Akteure in der Lage sein, mittelfristig jede benötigte Menge an internationalen Zertifikaten zu erstehen, da die Kaufkraft hoch ist. Es dürfte jedoch noch einige Jahre dauern, bis Zertifikate aus den neuen Artikel-6-Mechanismen in geeigneter Qualität zur Verfügung stehen, da insbesondere die Regierungen der Gastländer institutionelle Hürden überwinden müssen, welche durch die neue und dezentralisiertere Architektur des Pariser Abkommens entstehen. Vom Kauf von CDM-Zertifikaten aus dem früheren Kyoto-Protokoll wird nach 2020 abgeraten, da diese in der Regel keiner tatsächlichen Minderungsleistung mehr entsprechen (siehe Abschnitt 11.1). Bis 2024 könnte man allenfalls den Kauf von neuen CDM-Zertifikaten aus sogenannten «vulnerablen» Projekttypen in Erwägung ziehen, d.h. Projekte, welche ohne regelmässige Zahlungen aus dem Zertifikatsverkauf Gefahr laufen, aufgegeben zu werden. Dies sind z.B. Deponiegasabfackelung oder die Reduktion von Methanemissionen aus dem Abwasser⁶³.

Die ökonomischen Schattenpreise aus der IETA-Studie (11.2) können höchstens als unterer Rand für zukünftige Zertifikatspreise betrachtet werden. In einer jüngeren Studie schätzen Schwioger et al. (2019), dass die Preise von internationalen Zertifikaten im Zeitraum bis 2030 im Bereich 10 – 50 USD/tCO₂e liegen könnten.

Für Zertifikate aus Minderungsaktivitäten, welche hohen Massstäben bezüglich Umweltintegrität (inklusive Additionalität, Ausschluss der Doppelzählung und des Kaufs von «Hot air») und generellen Nachhaltigkeitsstandards genügen, dürften die Preise wohl eher am oberen Rand dieses Bereiches liegen. Werden die Minderungsaktivitäten so ausgestaltet, dass sie den Gastländern ermöglichen, das Ambitionsniveau ihres eigenen NDC-Zieles zu erhöhen (z.B. mit einer kurzen Kreditierungsperiode, so dass sich das Gastland nach ein paar Jahren die Minderungsleistung zur Verschärfung ihres NDC selbst anrechnen lassen kann (Füssler et al 2019), so können sich die Preise leicht nochmals verdoppeln oder verdreifachen.

Wahrscheinlich wird es aber schon bald Zertifikate zum Preis von wenigen US-Dollars (oder gar Cents) zu kaufen geben, da z.B. unter Artikel 6.2 Käufer und Verkäuferländer weitgehend frei in der Gestaltung der Regeln für den Transfer sind und viele Länder über beträchtliche «Hot Air» verfügen, weil die Business-as-usual (BAU)-Emissionen wohl unter den NDC-Zielen liegen.

⁶³ Siehe auch Projekttypen in rechter Spalte in Tabelle 6.

Zur Rolle des internationalen Zertifikatehandels wird deshalb gefolgert:

- Der internationale Zertifikatehandel gemäss Artikel 6 kann unter der Annahme einer umfassenden und globalen Dekarbonisierung in allen Ländern gemäss dem Pariser Abkommen nur eine sehr viel kleinere Rolle zur Reduktion der globalen Minderungskosten spielen, als etwa unter dem früheren Kyoto-Protokoll.
- Während einer beschränkten Zeit (bis ca. 2035) kann der Zertifikatshandel gewisse Kostenvorteile bringen. Dies darf aber nicht zu einer Verlangsamung der Dekarbonisierung der Infrastruktur im Kanton Zürich und der Stadt Zürich führen (kein «Lock-in-Effekt»). Deshalb könnten internationale Zertifikate temporär und z.B. ausschliesslich zur teilweisen Neutralisierung der grauen Emissionen von im Kanton resp. der Stadt Zürich bezogenen Gütern aus dem Ausland genutzt werden. Die Zertifikate würden dann auch im nationalen Register gelöscht und nicht für die Erreichung des Schweizer NDC-Ziels verwendet. Alternativ könnten die Reduktionen auch als «Results Based Payment» unter der Klimafinanzierung und ohne internationalem Transfer von Zertifikaten abgewickelt werden, solange sichergestellt werden kann, dass Minderungsleistungen dadurch zusätzlich bleiben (und nicht die Minderungs-Aktivitäten des Gastlandes reduzieren).
- Ein Ansatz für die Stadt könnte auch die vermehrte Nutzung von Synergien sein mit ihren Aktivitäten der Entwicklungszusammenarbeit, welche eine Klimaschutzkomponente aufweisen. Die Emissionsmindernde Wirkung von Aktivitäten wie z.B. die Verbesserung des öffentlichen Verkehrs in Entwicklungsländern kann quantifiziert werden und als Beitrag an die Zielerreichung des Gastlandes rapportiert werden. Vom internationalen Transfer von Zertifikaten in diesem Kontext wird aber abgeraten, da dies sehr aufwändig ist und wohl auch Zielkonflikte mit den Prinzipien der Entwicklungszusammenarbeit auftreten könnten.
- Grundsätzlich sollten aber Kantone und Städte zunächst ihre mögliche Rolle gegenüber dem Bund im internationalen Zertifikatshandel klären und ihre Strategien koordinieren, um effizient zu bleiben. Auch die Finanzierung solcher Instrumente wird kaum in einem kantonalen oder städtischen Alleingang in signifikantem Umfang erreicht werden können.
- Ohne strenge Kriterien für Umweltintegrität in der Wahl der Zertifikate und in der Durchführung hat der Zertifikatehandel kaum einen Effekt, respektive kann zu einer Netto-Zunahme der globalen Emissionen führen. Nur bei strengen Kriterien auch bezüglich Nachhaltigkeitsnutzen führt der Handel mit Zertifikaten zu einem Nutzen für Käufer- und Gastland sowie für die Atmosphäre.
- Eine weitere Form der internationalen Kooperation zur Emissionsminderung besteht im sogenannten «Insetting», bei dem Firmen mit ihren Zulieferern zusammenarbeiten, um die THG-Emissionen in den Vorketten systematisch zu reduzieren und dies als Mehrwert an

den Konsumenten bringen oder damit Vorteile, z.B. bei der öffentlichen Beschaffung, gegenüber Mitbewerbern erlangen. Dies kann auch verstärkt werden durch den neuen Ansatz des «Handprintings»: Hier berichten Firmen nicht nur über die negativen Auswirkungen ihrer Aktivitäten auf die Treibhausgas-Emissionen wie beim klassischen «Footprinting», sondern zeigen auf, welche positiven Auswirkungen ihre Aktivitäten auf das Klima entlang des gesamten Produktezyklus haben, z.B. wieviel Emissionen sie durch «Insetting» in ihren Zulieferketten reduzieren konnten. Im Idealfall entstehen so «klimaneutrale» Güter, welche z.B. in Ausschreibungsprozessen bevorzugt werden könnten.

- Der Aufbau eines robusten Systems für internationale Transfers von Zertifikaten wird später, bei der Verfügbarkeit von entsprechenden NETs, wichtig sein, damit Kanton Zürich und Stadt Zürich nachhaltige Zertifikate aus NETs in andern Ländern beziehen können, da in der dicht besiedelten Schweiz das tatsächlich erschliessbare Potenzial nicht ausreichen dürfte. Hier spielen die Pilotaktivitäten des Bundes zum Aufbau von robusten internationalen Zertifikatsmärkten eine wichtige Rolle.

Exkurs: Rolle der Beteiligungen von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EWZ, EKZ) an erneuerbarer Produktionskapazität im Ausland

Sowohl EWZ wie EKZ halten Beteiligungen an Kapazität zur Nutzung erneuerbarer Energien im Ausland, so z. B. an Onshore-Windparks in Deutschland oder Schweden. Es fragt sich, ob und wie diese Beteiligungen im Ausland zur Dekarbonisierung des Kantons und der Stadt «eingerechnet» werden dürfen.

Die Beteiligungen an Windparks werden in erster Linie nach Kriterien der betriebswirtschaftlichen Profitabilität ausgewählt. Sie erhalten in der Regel lokale staatliche Förderung und die mit der Energieproduktion verbundenen erneuerbaren Herkunftsnachweise (HKN) müssen an den Staat abgegeben werden. Eine Übertragung der HKN oder die «physische» Abnahme des grünen Stromes (etwa aus Norddeutschland) ist teilweise möglich und wurde bereits in Pilotprojekten realisiert, sie führen jedoch zu höheren Kosten und einer schlechteren Rentabilität. Deshalb ist nicht absehbar, dass dies auf grosser Skala umgesetzt werden kann. Solange das Angebot an grünen HKN wesentlich grösser ist als die Nachfrage, dürften grüne HKN auf absehbare Zeit kein zielführendes Instrument zur Reduktion der Netto-THG-Emissionen darstellen.

Aus der Perspektive der Klimawirkung würden die Artikel 6 Mechanismen theoretisch erlauben, mögliche Emissionsreduktionen durch die Finanzierung von erneuerbarer Stromerzeugung im Ausland in die Schweiz zu transferieren. In der Praxis haben aber Länder wie

Deutschland oder Schweden eigene ambitionierte Klimaziele und werden deshalb kaum je den Verkauf von Zertifikaten ins Ausland erlauben, da jedes transferierte Zertifikat in ihrer THG-Buchhaltung als zusätzliche Emission angerechnet werden müsste («corresponding adjustments»).

Der Hauptnutzen von Auslandsinvestitionen dürfte deshalb neben der finanziellen Performance im Gewinn an Erfahrung in Planung, Bau und Betrieb grösserer Windprojekte für die Elektrizitätsversorgungsunternehmen liegen, welche allenfalls für den Aufbau von Windparks in der Schweiz (oder im nahen Ausland mit direkten physischen Bezugsrechten) nützlich werden könnten. Zudem kann ein Beitrag an die europäische Energiewende geleistet werden.

12. Internationaler Handel von Zertifikaten aus Negativemissionstechnologien

Artikel 6 Mechanismen als Rahmen für internationale Transfers von NET-Zertifikaten

Wie Teil 1 aufzeigt, liegt das grösste, mittelfristig erschliessbare Potenzial für Negativemissionen vor allem im Ausland, insbesondere im Bezug auf die Speicherung. Ausserdem erfordert der grenzüberschreitende Transport und die geologische Speicherung von CO₂ im Ausland klare Regeln dahingehend, dass die Leistung nur einmal verbucht wird.

Das sich entwickelnde System der internationalen Zertifikatsmärkte unter Artikel 6 dürfte das Rückgrat der technischen, regulatorischen und institutionellen Infrastruktur bieten, um internationale Transfers von Negativemissionsleistungen sicher und transparent abzuwickeln und zu verbuchen. Dies ist speziell wichtig, da die Preise von technischen NET-Zertifikaten wesentlich höher sind als in herkömmlichen Zertifikatsmärkten und damit das System fähig sein muss, sehr grosse Werte international und sicher zu verschieben.

Wir sehen es primär als die Aufgabe des Bundes an, den Aufbau und die robuste Ausgestaltung der Artikel 6 Mechanismen zu fördern.

Globales Potenzial an NET-Zertifikaten

Es stellt sich die Frage, welcher Anteil des in Teil 1 identifizierten globalen Potenzials an Senkenleistungen auch in der Form von NET-Zertifikaten international verfügbar wären. Aus der Sicht des relativ geringen Bedarfes an NETs und der zu erwartenden relativ hohen Kaufkraft ist

davon auszugehen, dass die für die Schweiz resp. Kanton und Stadt Zürich notwendige Menge an NET-Zertifikaten beschafft werden könnte, wenn auch zu hohen Preisen.

Unterscheidung in der Anwendung von Zertifikaten aus verschiedenen NET-Ansätzen

Methodisch ergeben sich für NET-Zertifikate einige Besonderheiten. Insbesondere die Permanenz der Zertifikate muss sichergestellt werden können. Die Permanenz von NETs mit geologischer Speicherung scheint generell grösser, weshalb vorgeschlagen werden könnte, diese für die Kompensation von direkten Emissionen (innerhalb der territorialen Grenzen) zu verwenden.

Bei biologischen NETs ohne geologische Speicherung dürften weiterhin grosse Herausforderungen bezüglich der Definition der Basislinie und der Permanenz bestehen bleiben. Hier müssen methodisch sehr konservative Ansätze für die Basislinie gewählt werden und geeignete grosszügige «Bufferlösungen»⁶⁴ zur Minderung der Permanenzrisiken implementiert werden. Es wäre zu prüfen, diese mit grösseren Unschärfen behafteten biologischen NET-Zertifikate deshalb ausschliesslich zur Kompensation von indirekten Emissionen (z.B. graue Emissionen aus Importen) zu verwenden.

13. Rolle des Handels von nationalen Bescheinigungen

13.1. Bescheinigungen aus Kompensationsprojekten in Inland

Mit dem Instrument der Kompensationsprojekte bietet der Bund gemäss CO₂-Gesetz die Möglichkeit, Minderungsleistungen aus Projekten und Programmen zur Reduktion der THG-Emissionen im Inland bescheinigen zu lassen und für die Kompensation von Emissionen zu nutzen. Ähnlich wie beim internationalen Zertifikatshandel durch den CDM (Abschnitt 11.1) müssen Kompensationsprojekte in der Schweiz einen definierten Projektzyklus durchlaufen, werden gemäss einem Regelwerk geprüft und Additionalität und Referenzentwicklung bestimmt. Auch Kompensationsprojekte haben mit sehr ähnlichen Herausforderungen bezüglich dieser Prüfung wie der CDM zu kämpfen (Abschnitt Abschnitt 11.1).

Die Inland-Bescheinigungen werden in erster Linie von Importeuren fossiler Treibstoffe durch ihre Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation (KliK)⁶⁵ gekauft. Die Importeure sind gemäss CO₂-Gesetz verpflichtet, bis 2020 10% der CO₂-Emissionen aus dem Verkehr im Inland

⁶⁴ Bei einer Bufferlösung werden nicht alle Zertifikate aus einem Senken-Projektportfolio ausgegeben, sondern ein bestimmter Prozentsatz aller generierten Senkenzertifikate landet jeweils in einem Speicher. Kommt es zu einem «Reversal» der Senke, z.B. durch das Abbrennen eines geschützten Waldes, so werden Zertifikate aus dem Buffer verwendet, um die Zerstörung der Senke und die entsprechenden CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu kompensieren.

⁶⁵ <https://www.klik.ch/>

zu kompensieren und entwickeln und kaufen zu diesem Zweck Inland-Bescheinigungen. Gelingt die Kompensation nicht, so müssen diese zurzeit eine Strafe von 160 CHF pro nicht kompensierte Tonne bezahlen. Dies definiert gleichzeitig die obere Grenze der Ankaufspreise, welche für normale Projekte in der Regel um 100-140 CHF/t liegen.

13.2. Erfahrungen

Die Erfahrungen zeigen, dass der Bund mit dem Instrument der Kompensationsprojekte ein umfassendes und grundsätzlich funktionierendes System geschaffen hat. Trotz der relativ hohen Zahlungsbereitschaft durch KliK liegen aber die tatsächlich erreichten Minderungsleistungen – insbesondere bei Programmen – weit hinter den Erwartungen zurück. Gründe dafür könnten darin liegen, dass der Zertifikatshandel als Inlandinstrument wegen hohen Transaktionskosten verglichen mit den in der Schweiz in der Regel kleinen Projektgrössen und methodischen Problemen nicht unbedingt das effizienteste Instrument zur Emissionsminderung darstellt. Für Projekte zur Reduktion von CO₂ (z.B. in den Bereichen Gebäudewärme oder Verkehr) sind die zusätzlichen Beiträge aus dem Verkauf der Bescheinigungen relativ gering, sodass relativ wenige dieser Projekte ausschliesslich wegen den Bescheinigungen durchgeführt werden dürften. Der finanzielle Beitrag ist in der Regel besser für Projekte zur Reduktion von Methan-, Lachgas- oder F-Gas-Emissionen. Dies auch wegen der höheren Klimawirkung dieser Gase («Global Warming Potential») und der entsprechend höheren finanziellen Beiträge aus dem Verkauf von Bescheinigungen für diese Projekte.

Zwei Projekttypen generieren den Grossteil der Inlandbescheinigungen:

- die Anrechnung der Senkenleistung von Schweizer Holz (über 1 Mio t CO₂ in der Periode 2014 – 2017) und
- die Inverkehrsetzung von Biotreibstoff (0.8 Mio t CO₂ in 2012 – 2017)

Die beiden Projekttypen sind zusammen für rund 80% der total 2.25 Mio t CO₂ im Zeitraum 2012 bis 2017 ausgestellten Bescheinigungen aus registrierten Kompensationsprojekten verantwortlich. Während das Ausstellen von Bescheinigungen für die Förderung der Verwendung von Schweizer Holz vor allem auf den politischen Vorgaben des Art. 14 des CO₂-Gesetzes und kaum auf einer Netto-Zunahme der globalen Senkenleistung beruht, liefern die Biotreibstoffprogramme tatsächliche und zusätzliche Minderungsleistungen. Die Biotreibstoffe sind eines der wenigen Beispiele, wo das Instrument der Kompensationsprojekte auch für ein signifikantes Wachstum des Marktes führte. Dies war aber nur deshalb möglich, weil Biotreibstoff neben dem Beitrag aus dem Kompensationsprogramm durch den Wegfall der Mineralölsteuer auch in erheblichem Umfang von einer indirekten Förderung im Vergleich zu fossilem Treibstoff profitieren kann.

Generell gibt es in der Schweiz je nach Kanton schon eine breite Palette von Förderinstrumenten für Klimaprojekte. Wichtig ist, dass Doppelzählungen ausgeschlossen werden: Die Minderungswirkung von Kompensationsprojekten, z.B. auf kommunalen Kläranlagen, die von der Stiftung KliK in Form von Bescheinigungen erworben wurden, dürfen sich Gemeinden und der Kanton nicht zur eigenen Zielerreichung anrechnen lassen, da diese schon von den Treibstoffimporteuren genutzt werden.

13.3. Mögliche Anwendungen für den Kanton Zürich und Stadt Zürich

Grundsätzlich wäre denkbar, dass Kanton Zürich und Stadt Zürich Inlandbescheinigungen aufkaufen und diese stilllegen könnte, um z.B. Emissionen innerhalb der Kantons-/ resp. Stadt-Grenzen zu kompensieren.

Damit würde ein freier Markt genutzt und theoretisch könnten Minderungsleistungen zum tiefsten Preis erstanden werden. Praktisch zeigt sich aber, dass der Markt für Kompensationsprojekte im Inland beschränkt ist und KliK schon heute Mühe zeigt, genügend Projekte zu finden und Bescheinigungen kaufen zu können. Mit der laufenden Revision des CO₂-Gesetzes dürfte der Bedarf der Treibstoffimporteure nach Bescheinigungen signifikant steigen. Wenn nun Städte und Kantone auch noch Bescheinigungen kaufen wollen, wird der bisher schon kleine Markt nicht liefern können.

Gleichzeitig überarbeiten immer mehr Kantone und Städte ihre eigenen Klimaziele und passen diese an ein Netto-Null-Ziel an. Analog zur Situation im internationalen Zertifikatsmarkt (Kapitel 11) führt dies zu einer Verknappung und Angleichung der Preise für Minderungsleistungen. In der Praxis wären Inlandzertifikate vor allem noch in Kantonen und Städten verfügbar, die keine ambitionierte Klimapolitik durchführen. Politisch könnte es ungewünschte Anreize setzen, diese dann mit Zahlungen für Bescheinigungen zu belohnen.

Wir sehen deshalb keine signifikanten Vorteile in der Nutzung von Kompensationsprojekten auf kantonaler resp. städtischer Ebene, mit zwei Ausnahmen:

- Falls in der Schweiz Negativemissionstechnologien in grossem Stil betrieben werden, kann das bestehende Regelwerk des Bundes für diese angepasst werden und ein funktionierendes System für Registrierung, Verifikation, Ausstellung und Handel von Bescheinigungen von Senkenleistungen darstellen.
- Zertifikatsmärkte können eine gute Rolle als «Suchmaschine» für neuartige Minderungs- und Senkenaktivitäten bilden. Kanton und Stadt können z.B. bei Ausschreibungen für Innovationsförderung und anderen Fördermechanismen das Generieren von Bescheinigungen als einen von mehreren Zuschlags- und Auszahlungskriterien definieren, um innovative Projektideen gemäss ihrer Leistungsfähigkeit zu bezahlen («results based payment»).

14. Fazit und Ausblick zur Rolle von Zertifikatmärkten

Die Rolle von internationalen Märkten mit Emissions-Zertifikaten aus Verminderungsprojekten dürfte auch mittelfristig eher bescheiden bleiben und von temporärer Dauer sein, trotz theoretischem Potential zur Kostenreduktion. Es stellen sich beträchtliche methodische und institutionelle Herausforderungen. Hauptnutzen der Zertifikatmärkte liegt darin, Entwicklungsländern Zugang zu neuen Technologien ermöglichen, welche sie später dann zur Erreichung eigener Klimaziele befähigt.

Die für Stadt oder Kanton Zürich benötigten Zertifikatsmengen sollten sich (auf dem Papier) relativ einfach beschaffen lassen. Zertifikate von hoher Qualität bezüglich Umweltintegrität, Additionalität und Nachhaltigkeitsnutzen zu erhalten ist jedoch schwierig, insbesondere da der neue Artikel-6-Markt sich erst sehr langsam zu entwickeln beginnt.

Folgen alle Länder der Welt einem ambitionierten Reduktionspfad, so zeigt eine neuere Studie, dass internationaler Zertifikatshandel nur bis ca. 2030-2040 grössere Einsparpotentiale bringen könnten, danach gleichen sich die Minderungskosten in den Ländern stark an und die Kostenersparnis aus dem Handel wird klein. Bei Senkenaktivitäten dürften die spezifischen Unterschiede in den Kosten zwischen den Ländern permanent gross bleiben, da hier lokale Gegebenheiten die Kosten stark beeinflussen (z.B. geologisches Potential zur einfachen Speicherung, Bevölkerungsdichte, Verfügbarkeit von Flächen für biologische Senken ohne Konkurrenz zur Landwirtschaft etc.)

Internationalen Kompensationsleistungen aus Senkenprojekten dürften eine wichtige Rolle spielen, um Restemissionen im Kanton und der Stadt Zürich zu kompensieren, da zu wenig Fläche/ geeignete Gebiete in der dichtbesiedelten Schweiz für Senkenprojekte zur Verfügung stehen dürften. Gut gemachte biologische Senkenprojekte in Entwicklungsländern (wie Aufforstung und Schutz von Waldökosystemen) können auch grossen Nachhaltigkeitsnutzen bringen (Biodiversität, Schutz indigener Völker etc.). Wichtig bei allen Senkenprojekten ist es, die Permanenz der CO₂-Speicherung über lange Zeiträume sicherstellen. Die Permanenz ist insbesondere bei biologischen Senken ein kritischer Punkt und ist bei allen Senkentypen jeweils sorgfältig zu prüfen.

Bei der möglichen Verwendung von internationalen Zertifikaten von Senken mit unsicherer Permanenz gilt es einerseits auf robusten Buffer-Lösungen zu insistieren. Andererseits könnte man internationale Zertifikate aus biologischen Senken und technischen Senken mit unsicherer Permanenz nur zur Kompensation von Emissionen aus Vorketten ausserhalb der Schweiz nutzen.

Neben dem internationalen Zertifikatshandel besteht in der Schweiz auch ein Handel mit Bescheinigungen aus Kompensationsprojekten. Für Minderungsprojekte stellt dieser Inlandhandel in der Regel ein wenig effizientes Instrument dar. Mittelfristig dürfte dieser auch zu vermehrten Doppelzählungsproblemen führen, da Kantone und Städte mit Dekarbonisierungsplänen sich diese Minderungspotentiale nicht anrechnen lassen können, da diese an die Treibstoffimporteure verkauft wurden. Im Inland dürfte der Fokus deshalb in Zukunft auf Kompensationsprojekten aus Senkenaktivitäten liegen.

Literatur

- AgroCO2ncept (o. D.): AgroCO2ncept, <http://www.agroco2ncept.ch/home/home.html> (Download, 03.02.2020).
- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2018): Emissionen rückgängig machen oder die Sonneneinstrahlung beeinflussen: Ist «Geoengineering» sinnvoll, überhaupt machbar und, wenn ja, zu welchem Preis?, Swiss Academies Factsheets, 13 (4).
- Amt für Landschaft und Natur (ALN) (2020): Züricher Wald, Zahlen und Fakten, https://aln.zh.ch/internet/audirektion/aln/de/wald/zuercher_wald/zahlen_fakten.html (Download, 03.02.2020).
- Amt für Landschaft und Natur (ALN) (2016): NaturschutzGesamtkonzept: Bilanz 2015 und weitere Umsetzung, https://aln.zh.ch/dam/audirektion/aln/fns/fns_div/nsgk/NSGK_Bilanz_2015.pdf.spooler.download.1491808475722.pdf/NSGK_Bilanz_2015.pdf (Download, 03.02.2020).
- Amt für Landschaft und Natur (ALN) (2015): Waldentwicklung Kanton Zürich, Zwischenbericht 2015, https://aln.zh.ch/internet/audirektion/aln/de/wald/zuercher_forstdienst/planung_wald/auftrag_sektion_planung/wep/jcr_content/contentPar/download-list_3/downloaditems/waldentwicklung_kant.spooler.download.1461739704876.pdf/Waldentwicklung_Zwischenbericht_2015.pdf (Download, 03.02.2020).
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Luft (AWEL) (2020): Kehrichtverwertungsanlagen (KVA), https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/betriebe_anlagen_baustellen/abfallanlagen/kehrichtverbrennung_kva.html#subtitle-content-internet-audirektion-awel-de-betriebe_anlagen_baustellen-abfallanlagen-kehrichtverbrennung_kva-jcr-content-contentPar-textimage_4 (Download, 03.02.2020).
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Luft (AWEL) (2018a): Klimawandel im Kanton Zürich, Massnahmenplan Verminderung der Treibhausgase, AWEL, Zürich.
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Luft (AWEL) (2018b): Überprüfung der Kapazitäts- und Standortplanung der thermischen Verwertung von Abfällen im Kanton Zürich 2012-2035, AWEL, Zürich.
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Luft (AWEL) (2016): Lokale Energiequellen, https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/energie_radioaktive_abfaelle/energieplanung/jcr_content/contentPar/downloadlist/downloaditems/lokale_energiequell.spooler.download.1493983098177.pdf/Energiequellen_2016_web.pdf (Download, 05.04.2020).
- Beuttler, C. et al. (2019): The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy, FOEN, Bern.
- BKW Energie AG (2020): Biomassekraftwerk Otelfingen, <https://www.bkoag.ch/bko/anlage.aspx> (Download, 05.04.2020).

- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2018): Wald und Holz: Das Wichtigste in Kürze, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/inkuerze.html> (Download, 03.02.2020).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2016): Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2017, BAFU, Bern.
- Cames, M., Harthan, R., Füssler, J., Lazarus, M., Lee, C., Erickson, P., Spalding-Fecher, R. (2016): How additional is the clean development mechanism? Analysis of the application of current tools and proposed alternatives. Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/docs/clean_dev_mechanism_en.pdf (Download, 03.02.2020).
- Carbon Neutral Cities Alliance (CNCA) (2020): <https://carbonneutralcities.org/cities/> (Download, 07.03.2020).
- Carbon Neutrality Coalition (CNC) (2020): Members of the Carbon Neutrality Coalition, <https://www.carbon-neutrality.global/members/> (download, 07.03.2020).
- CAT (2020) Climate Action Tracker. <https://climateactiontracker.org> [13. April 2020]
- Chevalier, G. et al. (2010): Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal, in: Swiss Journal of Geosciences, 103, S. 427-455.
- Darby, M. (2019): Which countries have a net zero carbon goal? Climate Home News, <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/> (download, 07.03.2020).
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (o. D.): Klimaschutz durch Hochmoorschutz, <https://www.wsl.ch/de/projekte/klimaschutz-durch-hochmoorschutz-1.html> (Download, 03.02.2020).
- Etterlin, F.; Gsponer, R. (2015): Rekultivierte Böden nützen der Landwirtschaft, https://kofu-zup.ch/asp/db/pdf/ZUP82_15_bodenrekultivierung.pdf (Download, 03.02.2020).
- Flisch R. et al. (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, in: Agrarforschung, 16 (2), S. 1-97.
- Frolking, S.; Roulet, N. T. (2007): Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions, in: Global Change Biology, 13, S. 1079-1088.
- Fuss S.; Lamb W. F.; Callaghan M. W.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; Garcia, W. de O.; Hartmann, J.; Khanna, T.; Luderer, G.; Nemet, G. F.; Rogelj, J.; Smith, P.; Vicente, J. L. V.; Wilcox, J.; Dominguez, M. del M. Z.; Minx, J. C. (2018): Negative emissions – Part 2: costs, potentials and side effects, in: Environmental Research Letters, 13 (6), 063002.
- Füssler, J., Kessler, S., Wunderlich, A., Maibach, M., Bieler, C., Windler, L., Steinemann, M. (2020) Handlungsfelder zur Dekarbonisierung des Kantons Zürich. Grundlagenstudie. Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft.
- Greene, S. E. (2015a): Von der Kohlenstoffsенke zur Kohlenstoffquelle – und zurück?, https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/113331/7/GeoPanorama_1503_20.pdf (Download, 03.02.2020).

- Greene, S. E. (2015b): Wetlands as Climate Mitigation Infrastructure: A Carbon Footprint Assessment of the Wetlands of Kanton Zürich, https://kbnl.ch/wp-content/uploads/2016/06/SuzanneThesis_final.pdf (Download, 03.02.2020).
- Griscom, B. W. et al. (2017): Natural climate solutions, in: Proceedings of the National Academy of Sciences, 114 (44), S. 11645-11650.
- Grün Stadt Zürich (2020): Persönliche Kommunikation mit Regina Wollenmann, 10. Mai 2020.
- Gubler, L.; Braunschweiler, D. (2017): CO₂ kompensieren, in Hochmoore investieren, Schweizer Gemeinde, 10, S. 42-43.
- Hansen, L. et al. (2015): Targeting Investments To Cost Effectively Restore and Protect Wetland Ecosystems: Some Economic Insights, https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/45347/51896_err183_summary.pdf?v=42054 (Download, 30.03.2020)
- HHKW Aubrugg AG (2020): Was wir tun, <https://hhkw-aubrugg.ch/pages/was-wir-tun> (Download, 03.02.2020).
- Hurkuck, M.; Brümmer, C.; Kutsch, W.L. (2016): Near-neutral carbon dioxide balance at a semi-natural, temperate bog ecosystem, in: Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 121, S. 370-384.
- IETA (2019) The Economic Potential of Article 6 of the Paris Agreement and Implementation Challenges. Summary Report. International Emissions Trading Association (IETA) in Zusammenarbeit mit der Universität of Maryland. https://www.ieta.org/resources/International_WG/Article6/CLPC_A6_report_no_crops.pdf [January 16 2020].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019): Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018): Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014a): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014b): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005): Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ismail, S., Schwab, F., Tester, U., Kienast, F., Martinoli, D., & Seidl, I. (2009): Kosten eines gesetzeskonformen Schutzes der Biotope von nationaler Bedeutung, Technischer Bericht, WSL et al., Birmensdorf (u.a.).

- Johannes, A. et al. (2018): Organische Substanz und strukturelle Qualität des Oberbodens, in: Arbeitsgruppe Vollzug BodenBiologie (Hrsg.): Humus sapiens, VBBio-Bulletin-BioSA Nr. 18, FiBL, Frick, S. 9-15.
- Jonathan Schwieger, Urs Brodmann, Axel Michaelowa (2019): Pricing of Verified Emission Reduction Units under Art. 6. Gaining a Better Understanding of Possible Scenarios. Studie für die Schwedische Energieagentur. https://www.perspectives.cc/fileadmin/Publications/SEA_Pricing_Study.pdf
- Jürg Füssler, Anik Kohli, Randall Spalding-Fecher, Derik Broekhoff (2019) Article 6 in the Paris Agreement as an ambition mechanism. Options and recommendations. Schwedische Energieagentur. <https://www.infras.ch/de/projekte/klimaschutzabkommen-kooperation-verbessern-falsche-anreize-vermeiden/>
- Kanton Solothurn (2020): Ressourcenprogramm Humus, <https://so.ch/verwaltung/volkswirtschaftsdepartement/amt-fuer-landwirtschaft/direktzahlungen-und-foerderprogramme/kantonale-foerderprogramme/ressourcenprogramm-humus/> (Download, 03.02.2020).
- Kay, S. et al. (2019): Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe, in: Land use policy, 83, S. 581-593.
- Kollmuss, A., Füssler, J. (2015). Overview of Carbon Offset Programs. Similarities and Differences. World Bank PMR Technical Note 6, January 2015. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/21353>
- Leifeld, J. et al. (2019): Treibhausgasemissionen entwässerter Böden, Agroscope, Bern.
- Marti, F. et al. (2009): Praxishilfe zur Regeneration von Hochmooren im Kanton Zürich, https://aln.zh.ch/dam/audirektion/aln/fns/fns_div/praxishilfen_merkblatt/Praxishilfe_Hochmoore.pdf.spooler.download.1402575232026.pdf/Praxishilfe_Hochmoore.pdf (Download, 03.02.2020).
- Northern Lights (o. D.): Northern Lights Project, <https://northernlightsccs.eu/en> (Download, 02.02.2020).
- Olivine Foundation Netherlands (2019): Enhanced weathering of olivine, <http://smartstones.nl/> (Download, 02.02.2020).
- Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC); ProClim (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC / ProClim, Bern.
- Paul, S.; Schellenberger, A. (2015): Organische Böden, Klima und der Kohlenstoffmarkt, in: BGS Bulletin, 36, S. 57-69.
- Petrescu, A. M. R. et al. (2015): The uncertain climate footprint of wetlands under human pressure, in: Proceedings of the National Academy of Sciences, 112, S. 4594-4599.
- Regierungsrat des Kanton Zürich (2019): Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich, Sitzung vom 4. Dezember 2019, KR-Nr. 296/2019, https://www.zh.ch/bin/ktzh/rrb/beschluss.pdf?rrbNr=1136&name=RRB-2019-1136&year=2019&_charset_=UTF-8 (Download, 02.02.2020)

- Reid, H.; Huq, S.; Inkinen, A.; MacGregor, J.; Macqueen, D.; Mayers, J.; Murray, L. and Tipper, R. (2004): Using wood products to mitigate climate change: a review of evidence and key issues for sustainable development, IIED, London.
- Richi AG (2020): Produktion von Ökostrom, <https://www.richi-weiningen.ch/biomassekraftwerk/produktion-von-oekostrom/> (Download, 02.02.2020).
- Richner, W.; Sinaj, S. (2017): Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017), Agroscope, Bern.
- Seigo, S. L. et al. (2014): Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, S. 848-863.
- Smith, P. (2016): Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies, in: Global change biology, 22 (3), S. 1315-1324.
- Strefler, J. et al. (2018): Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks, in: Environmental Research Letters, 13 (3), 034010.
- Taylor, L. et al. (2016): Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification, in: Nature Climate Change, 6, S. 402-406.
- Tiefbau- und Entsorgungsdepartment der Stadt Zürich (2020): Über den Wald, <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/natur-erleben/stadtwald/ueber-den-wald.html> (Download, 02.02.2020).
- UNEP (2019): UNEP's Emissions Gap Report 2019. <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2020): Climate Neutral-Now, <https://unfccc.int/climate-action/climate-neutral-now> (download, 02.02.2020).
- Warnecke, C., Schneider, L., Day, T., La Hoz Theuer, S. and Fearnough, H. (2019) Robust eligibility criteria essential for new global scheme to offset aviation emissions. Nature Climate Change. <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0415-y>