

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

# CCS und CDR Perspektiven Kanton Aargau

## Ergänzender Bericht zu den Faktenblättern

Zürich, 16. Juli 2025

Felix Weber, Dr. Moritz Reisser, David Giger, Dr. Jürg Füssler

## **Impressum**

### **CCS und CDR Perspektiven Kanton Aargau**

Ergänzender Bericht zu den Faktenblättern

Zürich, 16. Juli 2025

b4079a\_Erlaeuternder\_Bericht\_CCS-CDR-Perspektiven-Kanton-AG.docx

### **Auftraggeber**

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

Lisa Hämmerli, Fachspezialistin Energiewirtschaft

Lars Kistler, Fachspezialist Luft

### **Autorinnen und Autoren**

Felix Weber, Dr. Moritz Reisser, David Giger, Dr. Jürg Füssler

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

## Inhalt

<b>Glossar</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1. Worum geht es bei CCS und CDR?	6
1.2. Fragestellungen und Vorgehen	7
<b>2. Absenkpfad und Restemissionen des Kantons Aargau 2050</b>	<b>9</b>
2.1. Wichtigste Annahmen zu Emissionen und Absenkpfad	9
2.2. Resultate Absenkpfad	10
2.3. Restemissionen	11
<b>3. Potenziale verschiedener CCS- und CDR-Anwendungen</b>	<b>13</b>
3.1. Betrachtete Technologien und wichtigste Annahmen	13
3.2. Resultate der Potenzialabschätzungen	18
3.3. Herausforderungen Logistik und Infrastruktur CCS	23
3.4. Potenziale der Weiterverwendung von CO <sub>2</sub> (CCU)	25
<b>4. Bedürfnisse der Unternehmen</b>	<b>26</b>
4.1. Hindernisse und Herausforderungen	26
4.2. Bedürfnisse	27
4.3. Fazit zur Sicht der Unternehmen	28
<b>5. Fazit und Empfehlungen</b>	<b>29</b>
5.1. Netto-Null 2050 mit CCS und CDR-Potenzial im Kanton grundsätzlich machbar	29
5.2. Zentrale Herausforderungen für Netto-Null im Kanton Aargau	30
5.3. Empfehlungen und Handlungsvorschläge INFRAS	31

## Glossar

BECCS	Bioenergie kombiniert mit CCS; Abscheidung und langfristige Speicherung von CO <sub>2</sub> (-> CCS) an Anlagen bei denen nachwachsende Rohstoffe als Energiequelle verwendet werden und daher eine negative CO <sub>2</sub> -Bilanz ermöglichen können. (-> CDR)
Biogene Emissionen	Emissionen aus biogenen Quellen, die als klimaneutral betrachtet und entsprechend nicht in der Treibhausgasbilanz angerechnet werden. Dazu gehören unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung oder Umwandlung nachwachsender Energieträger (z.B. Holzfeuerungen)</li> <li>▪ CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung von Klärschlamm</li> </ul>
CCS	Carbon Capture and Storage; CO <sub>2</sub> -Abscheidungs- und Speicherungstechnologien, mit denen CO <sub>2</sub> direkt an der emittierenden Anlage abgeschieden und anschliessend langfristig gespeichert wird. Im Falle von -> biogenen Emissionen (-> BECCS) kann dies negative Emissionen ermöglichen (-> CDR).
CCU	Carbon Capture and Utilization; CO <sub>2</sub> -Abscheidungstechnologien, mit denen CO <sub>2</sub> direkt an der emittierenden Anlage abgeschieden (-> CCS) und anschliessend weiter genutzt wird, z.B. zur Herstellung synthetischer Treibstoffe, in Baustoffen oder in Getränken. Die Wiederverwertung bzw. Mehrfachnutzung des Kohlenstoffs als Energieträger kann die Gesamtemissionen reduzieren, jedoch nicht als CDR wirken (-> CDR).
CDR	Carbon Dioxide Removal; Anthropogene, d. h. durch den Menschen verursachte Aktivitäten, die mit natürlichen und technischen Verfahren CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernen und dauerhaft speichern (-> Senke). Im deutschen Sprachgebrauch häufig allgemeiner auch als NET bezeichnet (-> NET).
CO <sub>2</sub> eq	CO <sub>2</sub> Äquivalente; Die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase werden auf die Klimawirkung von CO <sub>2</sub> bezogen (Global Warming Potential), so dass die Wirkung aller vorhandenen Treibhausgase mit einer Einheit dargestellt werden können. Eine Tonne Methanemissionen entspricht zum Beispiel rund 28t CO <sub>2</sub> eq (über 100 Jahre).
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage: CO <sub>2</sub> -Abscheidungstechnologien, welche nicht direkt an grosse CO <sub>2</sub> -Quellen angebunden sind, sondern durch aktive Luftfiltrierung CO <sub>2</sub> abscheiden und anschliessend langfristig Speicherung (-> CCS). Damit gilt DACCS auch als CDR-Technologie (->CDR)
Geogene Emissionen	Geogene Emissionen sind aus natürlichen und durch menschliches Einwirken herbeigeführte Emissionen aus geologischen Prozessen. Dazu gehört beispielsweise die Freisetzung von CO <sub>2</sub> bei der Verwitterung von Kalkstein oder beim Brennen von Klinker für die Zementproduktion.
Kohlenstoffspeicher	Komponente des Klimasystems (ausserhalb der Atmosphäre), die Kohlenstoff speichern, ansammeln oder freigeben kann. Die Herkunft des Kohlenstoffs ist dabei unbestimmt; der Kohlenstoff könnte der Atmosphäre entnommen sein (-> DACCS; NET; Senke) oder direkt an einer Anlage (-> CCS). Entsprechend kann die Speicherung von Kohlenstoff zu einer Verminderung von CO <sub>2</sub> -Emissionen führen oder zu negativen Emissionen.
NET	Negativ-Emissionstechnologien: Negativemissionstechnologien; Anthropogene, d. h. durch den Menschen verursachte Aktivitäten, die mit natürlichen und technischen Verfahren Treibhausgase, in der Regel CO <sub>2</sub> , aus der Atmosphäre entfernen und dauerhaft speichern (-> Senke). In der Regel wird heute von CDR gesprochen (-> CDR).

Pflanzkohle (Biochar)	Künstliche, unter Ausschluss von Sauerstoff hergestellte Pflanzkohle. Diese ist, je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsbedingungen, weitgehend chemisch stabil und kann in verschiedenen Formen als Kohlenstoffspeicher verwendet werden.
Restemissionen	Restmenge an Treibhausgasemissionen die gemäss gesetzten Zielen und geplanten Massnahmen zur Emissionsvermeidung – aus verschiedenen Gründen (u.a. -> schwer vermeidbare Emissionen) – zu einem gewissen Zeitpunkt bestehen bleiben. Um Netto Null Emissionen zu erreichen, müssen die Restemissionen demnach mit Negativemissionstechnologien (-> NET; CDR) kompensiert werden.
Schwer vermeidbare Emissionen	Treibhausgas-Emissionen, deren Entstehung nach heutigem Wissensstand nicht durch technologische Möglichkeiten vermieden werden kann (jedoch potenziell durch systemische Änderungen oder Verhaltensänderungen). Z.B. kann die Methanemission bei Kühen nicht gänzlich vermieden werden, jedoch der Umfang der Tierhaltung reduziert werden, wozu eine politische Abwägung notwendig ist.
THG	Treibhausgase; die wichtigsten davon sind CO <sub>2</sub> , Methan (CH <sub>4</sub> ), Lachgas (N <sub>2</sub> O), sowie wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), und Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> ). Diese Treibhausgase weisen alle unterschiedliche Treibhausgaspotenziale auf, welche mithilfe bestimmter Koeffizienten in CO <sub>2</sub> eq Werte umgerechnet werden können (->CO <sub>2</sub> eq).

## 1. Einleitung

Der Kanton Aargau verfolgt gleich wie die Schweiz das Ziel, bis 2050 Netto-Null Treibhausgasemissionen auszustossen. Der Kanton weist dabei einige besondere Herausforderungen auf: Er ist ein Industriekanton und verfügt beispielsweise über zwei grosse Zementwerke, die zusammen bereits etwa für ein Viertel zu den kantonalen Emissionen beitragen. Gleichzeitig wächst die Bevölkerung des Kantons stetig. Doch diese Ausgangslage bietet auch Chancen, da Carbon Capture and Storage (CCS; dt. Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff) an grossen Punktquellen effizient eingesetzt werden können.

Um das Netto-Null-Ziel zu erreichen, müssen vorerst die bestehenden Emissionen so weit wie möglich reduziert werden. Zusätzlich kann ein Teil der verbleibenden, teils schwer vermeidbaren CCS reduziert werden. Um Netto-Null zu erreichen, müssen danach verbleibende Restemissionen durch Carbon Dioxide Removal<sup>1</sup> (CDR; dt. CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre) ausgeglichen werden. CCS auf CO<sub>2</sub>-Emissionen aus nachwachsenden Rohstoffen gilt als CDR, sofern der Rohstoff nachhaltig bewirtschaftet wird (d.h. es wächst gleich viel nach, wie entnommen wird).

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine Grundlage zu den Themen Restemissionen, CCS und CDR im Kanton Aargau, insbesondere auch für die Klimastrategie des Kantons, zu bilden. Sie soll ein gemeinsames Verständnis zu wichtigen Handlungsbereichen, möglichen Lösungsansätzen und den zentralen Herausforderungen schaffen.

Dafür wurden einerseits Faktenblättern zu wichtigen Anwendungen von CCS- und CDR-Technologien erarbeitet. Die Faktenblätter fassen Potenziale, Kostenschätzungen, Logistikanforderungen sowie spezifische Vor- und Nachteile zusammen. Andererseits enthält der vorliegende Bericht eine Herleitung der Absenkpfade des Kantons Aargau bis 2050, eine Synthese zu den gesamten Reduktions- und CDR-Potenzialen sowie Resultate aus Interviews und einem Workshop, der mit der betroffenen Industrie im Kanton sowie weiteren Stakeholdern durchgeführt wurde.

### 1.1. Worum geht es bei CCS und CDR?

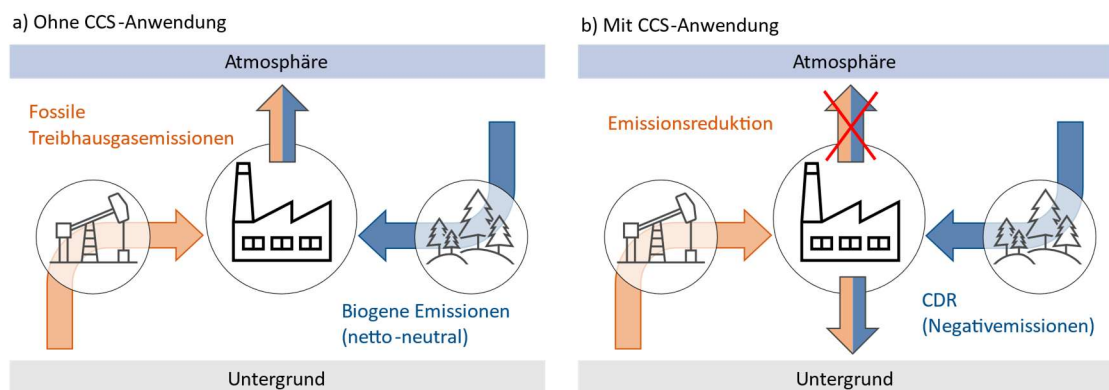
Wichtig im Zusammenhang mit der Treibhausgasbilanz ist primär die Unterscheidung zwischen Reduktionsmassnahmen und CDR. Ersteres vermindert die insgesamt ausgestossenen Emissionen. Zweiteres kann bereits emittierte Treibhausgasemissionen durch eine Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ausgleichen (netto). Bei CCS handelt es sich um eine Reihe verschiedener Technologien, die CO<sub>2</sub> zumeist an Punktquellen konzentrierte CO<sub>2</sub>-Emissionen abscheiden. Anschliessend wird der Kohlenstoff langfristig gespeichert.

---

<sup>1</sup> Im deutschen Sprachgebrauch ist auch der Begriff «Negativemissionen» geläufig.

CCS kann sowohl zu einer Emissionsreduktion führen (im Falle der Anwendung auf fossile oder geogene CO<sub>2</sub>-Emissionen) als auch zu CDR (im Falle der Anwendung auf biogene CO<sub>2</sub>-Emissionen). Abbildung 1 veranschaulicht dies am Beispiel einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA).

**Abbildung 1: Schema der CCS-Technologie am Beispiel einer Kehrichtverbrennungsanlage.**



Die orangenen Pfeile symbolisieren fossilen oder geogenen Kohlenstoff, die blauen Pfeile Kohlenstoff aus Biomasse, also aus nachwachsenden Quellen.

Grafik INFRAS.

Repräsentiert durch den orangenen Pfeil wird fossiler Kohlenstoff (z.B. als Öl) gefördert und in Produkte umgewandelt (z.B. Plastik). Beim Lebensende werden diese Produkte als Abfall in der KVA verbrannt, wodurch ohne CCS fossile Emissionen entstehen (a). Durch die CCS-Technologie in der KVA wird das fossile CO<sub>2</sub> abgeschieden und permanent gespeichert. Es handelt sich um eine Emissionsreduktionsmassnahme (b).

Abfall besteht aber rund zur Hälfte auch aus Biomasse (z.B. Nahrungsmittelreste oder Holz), dessen Verbrennung in der KVA mit blauen Pfeilen in Abbildung 1 dargestellt wird. Vorausgesetzt, dass die Biomasse im gleichen Umfang wieder nachwächst, und dabei der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzieht, entsteht durch die Verbrennung ein geschlossener Kreislauf der netto keine Emissionen verursacht (a). Wird dieser biogene Teil des Kohlenstoffs nach dem Verbrennungsprozess durch CCS abgeschieden und permanent gespeichert (z.B. im Untergrund), kann er nicht mehr in die Atmosphäre gelangen (b). Dadurch sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (netto) und es handelt sich um CDR.

## 1.2. Fragestellungen und Vorgehen

Die Studie orientiert sich an vier Fragestellungen. Die folgenden Absätze beschreiben pro Fragestellung das Vorgehen, die Quellen und die Endprodukte.

### **Frage 1: Welche Restemissionen sind 2050 im Kanton Aargau noch zu erwarten?**

Die Restemissionen und Absenkpfade des Kantons Aargau wurden basierend auf der Klimastrategie des Kantons, aus aktuellen Emissionsdaten und Annahmen aus den Energieperspektiven 2050+<sup>2</sup> hergeleitet. Die Resultate dazu werden in Kapitel 2 erläutert.

### **Frage 2: Was sind die CCS- und CDR-Potenziale im Kanton Aargau und welche Herausforderungen stellen sich dabei?**

Die Potenziale der wichtigsten CCS- und CDR-Technologien wurden primär durch Literaturrecherchen hergeleitet. Die Erkenntnisse aus der Literatur wurden mit Gesprächen mit Expert:innen plausibilisiert (ETH Zürich, BAFU, grosse Emittenten aus der Industrie, Fachexpert:innen aus der Verwaltung des Kantons Aargau, Expertise INFRAS). Zu einzelnen, für den Kanton relevanten Technologien wurden Faktenblätter erstellt. Dazu gehören:

- Bioenergie mit CCS (BECCS);
- CCS an KVA (CCS KVA);
- CCS bei Abwasserreinigungsanlagen (CCS ARA);
- CCS an Zementwerken;
- Pflanzkohle;
- Direct Air Capture (DACCS);
- Beschleunigte Gesteinsverwitterung.

Dieser Bericht enthält die relevantesten Annahmen dazu sowie eine Synthese zu den Gesamtpotenzialen. Diese sind in Kapitel 3 dargelegt.

### **Frage 3: Welche Bedürfnisse im Zusammenhang mit CCS und CDR stellen sich für die Unternehmen, insbesondere Grosseemittenten im Kanton Aargau?**

Die Bedürfnisse von Grosseemittenten und weiterer wichtiger Stakeholder wurden in drei Interviews im Dezember 2024 sowie in einem Workshop im Februar 2025 mit rund 25 Vertreter:innen aus der Industrie und Kantonsverwaltung identifiziert. Am Workshop nahmen Vertreter des Kantons, aus der Zement- und Chemieindustrie, Abfallverwertung und Energieproduktion teil. In Gruppenarbeiten und anschliessender Synthese wurden zuerst die grössten Hindernisse und Herausforderungen und anschliessend Bedürfnisse und mögliche Lösungsansätze diskutiert und erarbeitet. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus sind in Kapitel 4 zusammengefasst.

### **Frage 4: Welche Schlüsse, Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen lassen sich aus den ersten drei Fragen ableiten?**

Kapitel 5 enthält wichtige Erkenntnisse / Empfehlungen aufgrund der drei vorherigen Fragen.

---

<sup>2</sup> Prognos, INFRAS, TEP Energy, Ecoplan 2022: Energieperspektiven 2050+, siehe: [Energieperspektiven 2050+](#)

## 2. Absenkpfad und Restemissionen des Kantons Aargau 2050

### 2.1. Wichtigste Annahmen zu Emissionen und Absenkpfad

Der Kanton Aargau verfolgt bei der Emissionsbilanzierung das Territorialitätsprinzip, das grundsätzlich auf die Kantonsgrenzen beschränkt ist. In den Faktenblättern wird jedoch auch auf grenzüberschreitende Fragestellungen bezüglich des Transportes und der Speicherung von abgeschiedenen CO<sub>2</sub> hingewiesen. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen orientiert sich am internationalen Standard Greenhouse Gas Protocol<sup>3</sup>. Dieser umfasst drei Scopes<sup>4</sup>. Die quantitative Betrachtung der Restemissionen konzentriert sich in allen Sektoren auf Scope 1 und 2. Indirekte Emissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen (Scope 3) werden nur qualitativ betrachtet.

Der Absenkpfad für die Emissionen basiert auf den Klimaindikatoren des Kantons Aargau sowie dem nationalen Zielpfad, wie er in den Energieperspektiven 2050+ (ZERO Basis) festgelegt ist. Für eine präzisere Einschätzung wurden sektorspezifische Berechnungen durchgeführt, insbesondere für emissionsintensive Industrien wie die Zementproduktion oder KVA. Dabei flossen auch Daten aus Punktemissionsquellen (PRTR-Daten)<sup>5</sup>, Experteninterviews und weiteren Quellen mit ein.

Die grössten Emissionsquellen wurden mit spezifischen Annahmen bewertet. In der Zementindustrie wird gemäss der Roadmap 2050 von Cemsuisse<sup>6</sup> davon ausgegangen, dass sowohl die geogenen als auch die energetisch bedingten Emissionen jeweils um 50 % reduziert werden können. Zudem sollen künftig 75 % der energetisch bedingten Emissionen aus biogenen Quellen stammen. Bei den Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) gehen die Betreiber davon aus, dass sich weder die Abfallmenge noch die Abfallzusammensetzung bis 2050 wesentlich verändern werden. Daher werden die Emissionen der KVA als konstant angenommen. Die Emissionen aus der Chemieindustrie orientieren sich an der gesamtschweizerischen Entwicklung gemäss den Energieperspektiven 2050+, wobei eine Reduktion um 93 % bis zum Jahr 2050 erwartet wird.

<sup>3</sup> [Greenhouse Gas Protocol Standard](#) des World Resource Institute und World Business Council of Sustainable Development.

<sup>4</sup> Dabei sind Scope 1 Emissionen alle direkten, d. h. aus Quellen innerhalb der eigenen Grenzen stammenden, Emissionen; Scope 2 Emissionen die indirekten Emissionen aus ausserhalb erzeugtem und eingekauftem Strom, Dampf, Wärme und Kälte; und Scope 3 Emissionen alle sonstigen indirekten Emissionen, darunter z.B. die aus Herstellung und Transport eingekaufter Güter oder Verteilung und Nutzung der eigenen Produkte oder der Entsorgung von Abfällen oder Emissionen aufgrund von Geschäftsreisen. Siehe GHG Protocol: [ghg-protocol-revised.pdf](#).

<sup>5</sup> Siehe: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/zustand/schadstoffregister-swissprtr.html>

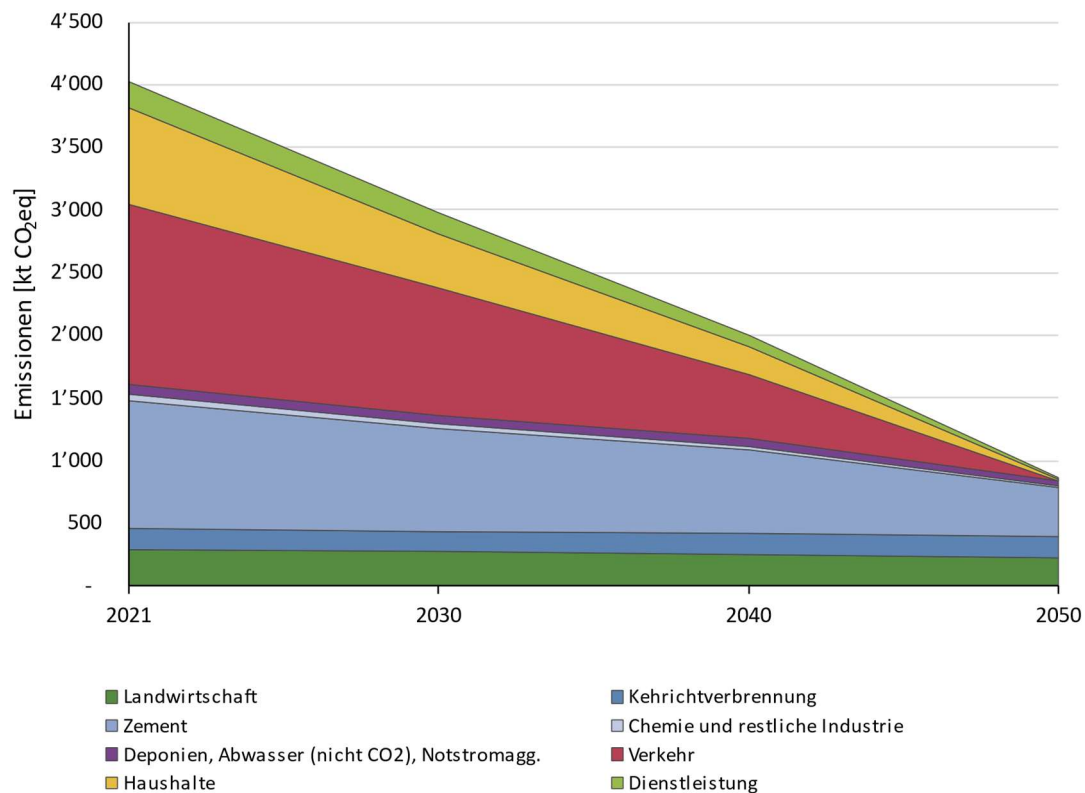
<sup>6</sup> Cemsuisse 2021: Roadmap 2050. Online: [https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse\\_Roadmap\\_210422.pdf](https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf)

## 2.2. Resultate Absenkepfad

Keine Abweichungen gegenüber dem bestehenden Aargauer Absenkepfad (Klimaindikatoren) gibt es bei den Sektoren Verkehr, Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft. Diese wurden aus den Klimaindikatoren übernommen, welche auf einem Modell des Bundes basieren und in allen Sektoren ausser der Landwirtschaft Emissionen nahe Null für das Jahr 2050 prognostiziert.

Im industriellen Sektor wurden die Subsektoren Zementproduktion, Kehrreichtverbrennung (KVA), Chemie sowie Deponien und Abwasser separat kalkuliert (bottom-up). Infolgedessen zeigen sich Abweichungen von den Klimaindikatoren der Klimastrategie (top-down). Die verfeinerte Berechnung zeigt, dass die Emissionsreduktion in der Industrie zwischen 2021 und 2050 55 % betragen könnte, während die Klimaindikatoren nur von 45 % ausgehen. Der Grossteil der Emissionen ist auf die Zementproduktion zurückzuführen, die gemäss Cemsuisse durch Prozessoptimierung und einen verstärkten Einsatz biogener Brennstoffe eine Reduktion von 60 % erreichen soll.

**Abbildung 2: Absenkepfad der anthropogenen Emissionen im Kanton Aargau**



Der neu berechnete Absenkepfad der Emissionen des Kantons Aargau mit dem aufgeschlüsselten Sektor Industrie («Kehrreichtverbrennung», «Deponien, Abwasser, Notstromaggregate», «Zement», «Chemie und restliche Industrie».

Grafik INFRAS. Quelle: Daten des Kantons Aargau, PRTR sowie eigene Berechnungen.

### 2.3. Restemissionen

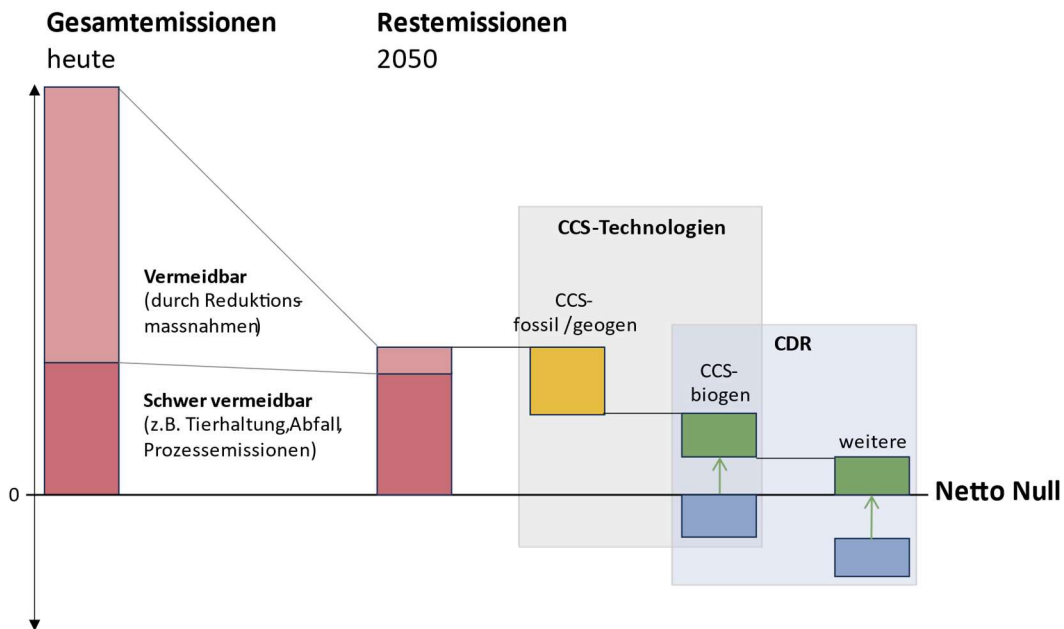
Insgesamt verbleiben für die vorliegenden Daten und Annahmen im Jahr 2050 noch Restemissionen von rund 870kt CO<sub>2</sub>eq, welche durch CCS weiter reduziert und durch CDR ausgeglichen werden müssen. Davon ist ein grosser Teil sogenannte «schwer vermeidbare» Emissionen, welche aktuell nicht durch technische Massnahmen verhindert werden können. Dazu gehören beispielsweise Emissionen in der Landwirtschaft (insb. Tierhaltung), Prozessemissionen (z.B. Brennung von Kalkstein zu Klinker im Zementsektor) sowie Emissionen aus Abfallverwertung und Abwasser.<sup>7</sup> Diese schwer vermeidbaren Emissionen können teilweise, mindestens im Zementsektor und bei den KVA, durch CCS weiter reduziert werden. Im Bereich Landwirtschaft und ARA gestaltet sich dies jedoch schwierig, da es sich bei den Emissionen Grossteils nicht um CO<sub>2</sub> handelt (sondern Methan und Lachgas) und bei der Landwirtschaft zusätzlich keine grossen Punktquellen vorhanden sind.

Somit verbleiben Restemissionen, die im letzten Schritt durch CDR ausgeglichen werden müssen. Abbildung 3 zeigt schematisch die Kaskade von den heutigen Gesamtemissionen, über die verbleibenden Restemissionen im Jahr 2050, CCS- und CDR-Potenziale hin zu Netto-Null auf.

---

<sup>7</sup> Siehe Bundesamt für Umwelt BAFU (2025): Faktenblatt, CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung: Übersicht zum rechtlichen Rahmen.

Abbildung 3: Schematische Darstellung Massnahmen, um Netto-Null zu erreichen



Die Balken repräsentieren Treibhausgasemissionen. Rot = Emissionen, die zur Treibhausgasbilanz beitragen; gelb = Reduktionen durch CCS; grün = Ausgleich durch CDR durch CCS auf Emissionen aus Biomasse (nachwachsenden Rohstoffen) sowie weitere CDR-Technologien; blau = biogener oder atmosphärischer Kohlenstoff, der nicht zur Treibhausgasbilanz beiträgt und im Falle von CDR sogar negativ ist. Die Grafik basiert auf der Annahme, dass auch ein Teil grundsätzlich vermeidbarer Emissionen im Jahr 2050 vorhanden bleibt. Zu beachten ist, dass es sich bei den Grössenordnungen lediglich um ein fiktives Schema handelt und die realen Grössenverhältnisse der verschiedenen Beiträge abweichen können.

Grafik INFRAS.

Neben der permanenten Speicherung von Kohlenstoff im Falle von CCS, kann das CO<sub>2</sub> nach dem Abscheiden auch als Wertstoff z.B. in Form eines synthetischen Treibstoffes weiterverwendet werden (Carbon Capture and Utilization; CCU). Dies kann dann eine Reduktionsmassnahme darstellen, falls der Kohlenstoff am Ende der Nutzung wieder abgeschieden und gespeichert wird. Mehr dazu in Kapitel 3.4.

### 3. Potenziale verschiedener CCS- und CDR-Anwendungen

Neben Carbon Capture and Storage (CCS) stehen eine Reihe von Carbon Dioxide Removal (CDR) Technologien zur Verfügung, welche das Potenzial aufweisen, einen gewissen Teil der Restemissionen per 2050 auszugleichen. Nicht alle dieser Technologien haben ein wesentliches Potenzial, insbesondere, wenn man sich auf das Kantonsgebiet Aargau beschränkt. Somit sind nicht alle Technologien gleich relevant für den Kanton, wobei sich die Relevanz durch folgende Faktoren erschliesst: quantitatives Potenzial, Einfluss / Steuerbarkeit durch die öffentliche Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Die Relevanz einzelner Technologien wurde in den Faktenblättern zusammenfassend dargestellt. Keine Beachtung in den Faktenblättern fanden aufgrund der Relevanzeinschätzung folgende Technologien:

- Ozeanmanagement (Ozeandüngung, Ozeanalkalinisierung etc.), da dies innerhalb der Kantons- (und Landes-)Grenzen keine Rolle spielt (siehe Kapitel 3.2.4).
- Boden- und Waldmanagement, da die Permanenz der Kohlenstoffsенke an die anhaltende Bewirtschaftung gebunden ist. Somit kann keine hinreichende langfristige Permanenz sichergestellt werden. Insbesondere das Waldmanagement ist jedoch von grosser Bedeutung für die verfügbare Biomasse, die unter anderem für BECCS und Pflanzenkohle genutzt wird, sowie für die Verwendung von Holz im Bau. Entsprechend ist das Waldmanagement auch in den Faktenblättern, bei denen es um BECCS geht, berücksichtigt (siehe Kapitel 3.1.5 und 3.2.4).

#### 3.1. Betrachtete Technologien und wichtigste Annahmen

Um die Potenziale, Kosten und Energiebedarfe der CCS- und CDR-Technologien im Jahr 2050 abzuschätzen, müssen viele und zum Teil weitreichende Annahmen getroffen werden.

**Dies führt zu beträchtlichen Unsicherheiten in den Ergebnissen.**

##### 3.1.1. Carbon Capture and Storage (CCS) -Technologien

Aktuell werden vor allem drei CCS-Technologien für die Abscheidung an industriellen Grossanlagen diskutiert, wobei zum jetzigen Zeitpunkt grosse Unsicherheit besteht, welche dieser Technologien (oder noch Weitere) sich für welchen Anwendungsfall durchsetzen werden, da die Technologien als Gesamtsystem betrachtet noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium stecken. Im Folgenden werden die drei Technologien kurz beschrieben und für welche Anwendungsfälle sie angenommen wurden.

### Aminwäsche

Die Aminwäsche (mit Monoethanolamin; MEA) wurde bereits 1930 entwickelt und ist das bisher gängigste Verfahren zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Abgasen von Punktquellen.<sup>8</sup> Bei der Aminwäsche wird das CO<sub>2</sub>-reiche Abgas in einem ersten Schritt in einem Medium mit fein verteilten Tröpfchen eines Amins unter Bildung temporärer Carbamidsäuren gebunden. Anschliessend werden diese in einem zweiten Schritt, bei hohen Temperaturen wieder freigesetzt, woraufhin das nun reine CO<sub>2</sub> abgeleitet werden kann. Potenziell problematisch sind bei der Aminwäsche die hoch krebserregenden Amine und Nitrosamine, die im Prozess eingesetzt werden, respektive entstehen.<sup>9</sup> Gefährdungen können jedoch durch den Einsatz nicht-volatiler Amine grösstenteils vermieden werden.<sup>10</sup> Die Effizienz und der Energiebedarf pro abgeschiedener Tonne CO<sub>2</sub> hängt stark von der Konzentration der Aminlösung und des CO<sub>2</sub> im Abgas ab. In der Regel werden rund 1.1 MWh Wärmeenergie und 0.12 MWh elektrische Energie für eine Tonne CO<sub>2</sub> gerechnet.<sup>11</sup>

Die Aminwäsche bildet die Grundannahme für die Potenziale von BECCS und CCS KVA.

### Hot Potassium Carbonate (HPC)

Das Prinzip von HPC ist sehr ähnlich zu dem der Aminwäsche. Anstelle von Aminen wird hier jedoch Kaliumkarbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) genutzt, welches mit CO<sub>2</sub> und Wasserdampf zu Kaliumhydrogenkarbonat (KHCO<sub>3</sub>) reagiert. Dieses wird anschliessend erhitzt, um das reine CO<sub>2</sub> wieder freizugeben. Der Vorteil von HPC gegenüber der Aminwäsche liegt im günstigen und weniger schädlichen Sorptionsmittel und dem geringeren Energiebedarf. Nachteilig wirkt sich aus, dass HPC nicht bei tiefen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen einsetzbar ist und dass neben CO<sub>2</sub> auch Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) gebunden und abgeschieden wird, was zu Komplikationen führen kann, wenn reines CO<sub>2</sub> abgeschieden, respektive weiterverwertet werden soll.<sup>12</sup> Ebenfalls ist HPC noch bedeutend weniger oft praktisch eingesetzt worden als die Aminwäsche.

### Oxyfuel

Im Oxyfuel-Verfahren wird der Brennstoff statt mit Luft in einer Atmosphäre aus reinem Sauerstoff verbrannt. Das dadurch entstehende Rauchgas ist nicht mit Luft-Stickstoff verdünnt und besteht im Wesentlichen aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Der Wasserdampf kann mit wenig Aufwand kondensiert werden, so dass ein hochkonzentrierter CO<sub>2</sub>-Strom (90 – 99 %) übrigbleibt,

<sup>8</sup> Bottoms, R. (1930): Process for separating acidic gases. USA Patent US 1783901.

<sup>9</sup> Das BAFU erarbeitet hierzu aktuell eine Vollzugsempfehlung bzgl. Luftreinhaltung, welche entsprechende Grenzwerte beinhalten soll.

<sup>10</sup> Lerche, B.M., et al. (2009): CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gas using Amino Acid Salt Solutions. In Energy solutions for CO<sub>2</sub> emission peak and subsequent decline. Proceedings (pp. 233-241).

<sup>11</sup> Roussanaly, S., et al. (2017): Techno-economic Analysis of MEA CO<sub>2</sub> Capture from a Cement Kiln – Impact of Steam Supply Scenario. Energy Procedia.

<sup>12</sup> Speight, J.G. (2019): Natural Gas (Second Edition), chapter 8, p.277-324. Gulf Professional Publishing.

welcher relativ einfach weiterverwertet werden kann. Das Oxyfuelverfahren wird aktuell vor allem im Bereich Zement diskutiert, da hier die technische Anbindung vergleichsweise einfach ist und durch den Sauerstoff insgesamt weniger Brennstoff für die gleiche Wärmeleistung eingesetzt werden muss. Dafür benötigt die Bereitstellung des reinen Sauerstoffs hohe Mengen an Strom, wodurch sich der Strombedarf eines Zementwerks verdreifachen kann.<sup>13</sup> Ein grundsätzlicher Vorteil der Oxyfuel-Technologie ist die sehr hohe Abscheidungsrate und Reinheit des CO<sub>2</sub>.<sup>13</sup>

Oxyfuel bildet die Grundannahme für CCS-Zement (und damit auch CCS ARA).

### 3.1.2. Kosten

Für die Kostenabschätzung wurden drei Referenzstudien herbeigezogen, die alle zu ähnlichen Kostenschätzungen für CCS und die weiteren CDR-Technologien kommen.<sup>14,15,16</sup> Grundsätzlich sind alle Kostenschätzungen per 2050 und inklusive Transport und Speicherung zu verstehen.<sup>17</sup> Dabei variieren die Schätzung zwischen rund 150 und 200 CHF / t CO<sub>2</sub> für CCS sowie beschleunigte Gesteinsverwitterung (ERW). Deutlich tiefere Kosten werden für Pflanzkohle (<50 CHF / t CO<sub>2</sub>) geschätzt und deutlich höhere Kosten für Direct Air Capture and Storage (DACCS; 200-450 CHF / t CO<sub>2</sub>). Grundvoraussetzung für alle CCS-Anwendungen ist eine europäische Pipelineinfrastruktur und dadurch geringe Transportkosten (20-80 CHF / t CO<sub>2</sub>). Ausserdem wird in allen Fällen von starken Skalierungseffekten ausgegangen, welche die Kosten in Zukunft deutlich senken sollen. Das bedeutet, dass im Falle einer komplexeren Transportlogistik, einer langsameren Technologieentwicklung oder eines weniger schnellen Ausbaus der Technologien teils deutlich höhere Kosten anzunehmen sind. Darüber hinaus gilt zu beachten, dass die Kosten vor dem Jahr 2050 und insbesondere für frühe Pilotprojekte noch massiv höher ausfallen dürften.<sup>18</sup>

### 3.1.3. Transport- und Speicherlogistik

Wie oben bereits erwähnt, gehen die meisten Schätzungen zu Kosten und Potenzialen von CCS von einem funktionierenden, internationalen Pipelinennetzwerk aus, welches alle grossen

<sup>13</sup> Weber M. (2024): AC2OCem - Accelerating Carbon Capture using Oxyfuel Technology in Cement Production. Published by the Swiss Federal Office of Energy SFOE.

<sup>14</sup> Brunner C., Knutti R. (2022). Potenziale und Kosten der CO<sub>2</sub>-Entfernung in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern.

<sup>15</sup> M. Albicker (dena) & M. Eichler (BAK), et al. (2023), «Carbon Capture & Storage (CCS) – Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050». Dena und BAK im Auftrag des BAFU.

<sup>16</sup> Honegger und Füssler et al. (2020): 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.

<sup>17</sup> Grundannahmen zu den Kosten wurden nicht in allen Studien offengelegt (z.B. Inflationsbereinigung). Die Studie von BAK rechnet jedoch mit Preisen des Jahres 2020, «um einen inflationsbereinigten Vergleich mit heutigen Grössenordnungen zu gewährleisten» (Zitat).

<sup>18</sup> Vgl. CCS Anlage Werdhölzli ZH, die aktuell mit über CHF 700 / t CO<sub>2</sub> bis 2050 rechnet, wobei die Punktquelle auch relativ klein ist. Siehe: [https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/actions/EN\\_M1](https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/actions/EN_M1).

Punktquellen (mindestens 100kt CO<sub>2</sub> / Jahr) in der Schweiz abdeckt und den Transport in Regionen mit guten geologischen Voraussetzungen für die Speicherung bietet.<sup>19</sup> Es wird darüber hinaus angenommen, dass der Grossteil der Speichermenge im Ausland gespeichert werden muss und nur ein kleiner Teil, insbesondere von kleinen Punktquellen in Recycling- bzw. Abbruchbeton und geologischen Stätten innerhalb der Schweiz gespeichert werden kann. Für die Mineralisation in basischen Gesteinen wird in der Schweiz kaum ein realisierbares Potenzial erwartet.<sup>20,21</sup> Für das Einbringen in tiefliegenden Wasserschichten im Mittelland wird zwar ein relativ hohes Potenzial modelliert<sup>22</sup>, es stellen sich jedoch noch viele Fragen hinsichtlich Kosten, Logistik und gesellschaftlichen Hürden (Speicher vor allem in bevölkerungsreichen Regionen), so dass auch hier zurzeit nicht von einem grossen Potenzial ausgegangen werden dürfte.

Falls die hier beschriebene Grundannahme eines Pipelinennetzwerks nicht erfüllt wird, ist mit deutlich höheren Kosten für alle CCS-Technologien und mit tieferen Gesamtpotenzialen zu rechnen.

#### 3.1.4. Vor- und nachgelagerte Emissionen und CO<sub>2</sub>-Verluste im Transportprozess

Es wird hier die stark vereinfachte und sehr optimistische Annahme getroffen, dass das Transportsystem und die vor- und nachgelagerten Prozesse im Jahr 2050 auch international weitestgehend Netto-Null erreichen und somit keine relevanten Scope 2 / Scope 3 Emissionen für die CCS und CDR-Prozesse mehr anfallen. Ebenfalls wurden keine Verluste von entweichendem Gas in der gesamten Prozesskette, inkl. Transport angenommen.

Diese Annahmen wurden getroffen, weil Stand heute völlig unklar ist, wie hoch allfällige vor- und nachgelagerte Emissionen im Jahr 2050 ausfallen werden und sie sich dies auf die Lebenszyklusemissionen und das Gesamtpotenzial auswirken. Deshalb gehen wir vom Best-Case aus, dass die internationalen Klimaziele bis 2050 weitestgehend erreicht werden. Dennoch werden wir darauf hinweisen, dass die Ergebnisse sehr optimistisch einzustufen sind.

Darüber hinaus wurde eine Abscheidungsrate von 90% des im Abgas befindlichen CO<sub>2</sub> für alle CCS-Anwendungen angenommen, was in etwa dem aktuellen Stand der Technik entspricht (siehe Kapitel 3.1.1).

<sup>19</sup> Saipem (2020): CO<sub>2</sub>NET Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO<sub>2</sub> Sammel-Netzwerk in der Schweiz. BFE

<sup>20</sup> Martin, A., et al. (2025): Potential and challenges of underground CO<sub>2</sub> storage via in-situ mineralization in Switzerland, *Swiss Journal of Geosciences*.

<sup>21</sup> Albicker (dena) & Eichler (BAK), et al. (2023), «Carbon Capture & Storage (CCS) – Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050». Dena und BAK im Auftrag des BAFU.

<sup>22</sup> Gunatilake, T., et al. (2025): Quantitative modeling and assessment of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers: A case study in Switzerland, *Carbon Capture Science & Technology*.

### 3.1.5. Weitere Annahmen

Analog zu den Restemissionen wurde auch für das Gesamtpotenzial grundsätzlich das Territorialprinzip angewendet. Das heisst, im Falle von CCS sollte mindestens die Abscheidung, bei Pflanzkohle und beschleunigter Gesteinsverwitterung die Ausbringung innerhalb der Kantongrenzen stattfinden. Theoretisch könnte das Gesamtpotenzial durch Anwendungen von CCS/CDR ausserhalb der territorialen Grenzen deutlich erhöht werden, insbesondere bei DACCS, jedoch auch durch andere Technologien.

Weiterhin wird die verfügbare Biomasse per 2050 für BECCS, Pflanzkohle und Zementfeuerungen ebenfalls ohne zusätzliche<sup>23</sup> Importe aus dem Ausland angenommen. Dies vor dem Hintergrund, dass bei Importen von Biomasse, insbesondere von Holz nicht sicher nachgewiesen werden kann, dass diese aus nachhaltigen Quellen stammt und damit nicht zu wesentlichen zusätzlichen Emissionen geführt hat. Weiter haben auch die Länder der EU ihre eigenen Strategien zur Biomassennutzung auf dem Weg zu Netto-Null.

Basierend auf einer Studie für den Kanton Aargau<sup>24</sup>, wurde ein zusätzliches Senken-Potenzial durch Holz von rund 65 kt CO<sub>2</sub>eq im Jahr 2050 verglichen zu 2021 angenommen, welches durch BECCS, Pflanzkohle und Zementwerke mit CCS genutzt werden könnte.

Für die CCS-Anwendungen wurde grundsätzlich eine Mindestkapazität der Anlage von 50kt CO<sub>2</sub>eq / Jahr vorausgesetzt, wobei in einzelnen Fällen auch tiefere Punktquellen einbezogen wurden (Holzfeuerung rund 40 kt CO<sub>2</sub>eq / Jahr). Dieser Annahme liegt zugrunde, dass für einen Anschluss an ein Pipelinennetzwerk aus ökonomischen Gründen aktuell nur Punktquellen >100kt CO<sub>2</sub>eq / Jahr berücksichtigt wurden, es jedoch bei Bedarf und unter höheren Kosten und Logistikaufwänden auch denkbar ist, kleinere Punktquellen zu erschliessen<sup>25</sup>. Ausserdem ist es bei Biogasanlagen auch ohne aufwendige CCS-Technologien vergleichsweise einfach, reines CO<sub>2</sub> abzuscheiden, weshalb hier die Punktquellengrösse eine untergeordnete Rolle spielt.

### 3.1.6. Abschlussbemerkung: Unsicherheiten sind hoch, Annahmen optimistisch

Alles in allem sind die hier getroffenen Grundannahmen, insbesondere zu den Kosten und den Lebenszyklus-Emissionen sehr optimistisch. Es bestehen hohe Unsicherheiten hinsichtlich des technologischen Fortschrittes, der tatsächlich umgesetzten Infrastruktur und den getroffenen politischen Massnahmen bis 2050. Entsprechend muss alles unternommen werden, um die Grundannahmen zu erfüllen und das hier dargelegte Gesamtpotenzial auch tatsächlich (zu den angegebenen Kosten) ausschöpfen zu können.

<sup>23</sup> D.h. nicht höher als im Jahr 2021.

<sup>24</sup> O'Connor et al. (2024): CO<sub>2</sub>-Wirkung des Aargauer Waldes, EBP. Gilt für das Szenario mit CO<sub>2</sub>-optimierter Waldbewirtschaftung.

<sup>25</sup> Die CCS-Anlage am Werdhölzli Zürich liegt beispielsweise an einer Punktquelle von rund 20kt CO<sub>2</sub>eq / Jahr. Siehe: [https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/actions/EN\\_M1](https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/actions/EN_M1)

## 3.2. Resultate der Potenzialabschätzungen

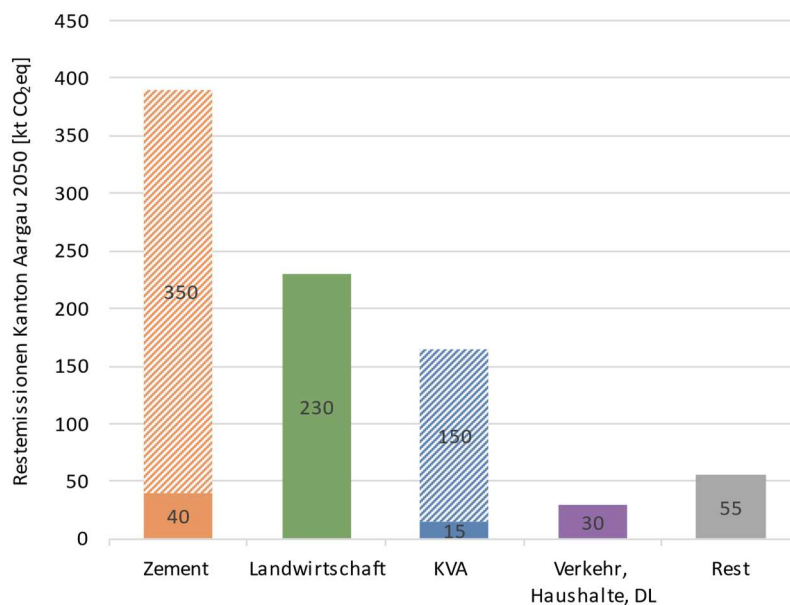
### 3.2.1. Reduktionspotenzial durch CCS

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, besteht das grösste Potenzial für CCS-Technologien bei den vorhanden grossen Punktquellen im Kanton Aargau. Diese umfassen vor allem die beiden Zementwerke und die KVA. In den anderen Sektoren gibt es keine nennenswerten Punktquellen mit CO<sub>2</sub>-Emissionen, die für CCS genutzt werden könnten. Abbildung 4 zeigt die Restemissionen per 2050 und die durch CCS möglichen Reduktionspotenziale im Überblick auf. Wir schätzen, dass von den rund 870 kt CO<sub>2</sub>eq an Restemissionen

- rund 150 kt CO<sub>2</sub> durch CCS an KVA und
- rund 350 kt CO<sub>2</sub> durch CCS an Zementwerken

reduziert werden können, was zusammen ca. 57% der Restemissionen entspricht. Es verbleiben somit noch rund 370 kt CO<sub>2</sub>eq, welche durch CDR-Technologien (inkl. BECCS) ausgeglichen werden müssen.

**Abbildung 4: Restemissionen und CCS-Reduktionspotenziale Kanton Aargau 2050 [kt CO<sub>2</sub>eq]**



Die Balken repräsentieren die gesamten prognostizierten Restemissionen 2050. Die schraffierten Flächen zeigen das abgeschätzte Potenzial für die Reduktion durch CCS-Anwendung in den entsprechenden Sektoren auf. Die nicht-schraffierten Flächen entsprechen somit den verbleibenden Restemissionen nach CCS pro Sektor.

Grafik INFRAS.

### 3.2.2. Ausgleichspotenzial durch CDR

Ausgehend von der Verfügbarkeit von Biomasse und der Möglichkeit von BECCS kann CCS zu einem erheblichen CDR-Potenzial führen. So schätzen wir die verfügbare Biomasse für die energetische Nutzung (Biogas, Holzfeuerungen, KVA und Zementwerke) sowie Pflanzenkohle im Jahr 2050 auf ca. 400 kt CO<sub>2</sub>eq ein, was einer Zunahme von 65 kt CO<sub>2</sub>eq (rund 20 %) gegenüber 2021 entspricht<sup>26</sup>. Von dieser Biomasse wird jedoch zumindest aktuell noch ein erheblicher Teil (über 40 kt CO<sub>2</sub> / Jahr) in dezentralen Holzfeuerungen ohne relevantes CCS-Potenzial genutzt (weil zu klein) und ein weiterer Teil stammt aus Importen von Biomasse (v.a. Holz, Nahrungsmittel) mit unklarer CO<sub>2</sub>-Bilanz, welche konservativ als nicht nachhaltig eingeschätzt werden muss. Auch die Abscheidungsrate von CCS-Anlagen von geschätzt 90 Prozent führt dazu, dass nicht das gesamte Biomassepotenzial erschlossen werden kann. Somit gehen wir von einem totalen Biomasse-Potenzial von insgesamt noch rund 335 kt CO<sub>2</sub> aus, welches sich auf die Produktion von Biogas, Holzfeuerungen, KVA, Zementwerke sowie Pflanzenkohle verteilt.

Wie genau sich die Nutzung der Biomasse, insbesondere des Energieholzes, aber auch des Altholzes in Zukunft auf die verschiedenen Anwendungsfelder verteilt, ist schwer einzuschätzen. Für das Gesamtpotenzial durch CDR ist die Verteilung der Biomasse von untergeordneter Relevanz, weil die Abscheidungseffizienzen bei allen Anwendungen in einem ähnlichen Rahmen liegen. Wichtig ist dabei jedoch, dass einerseits die energetische Nutzung an CCS gekoppelt ist (was in der Regel eine gewisse Punktquellengrösse erfordert) und andererseits bei Pflanzenkohle eine grösstmögliche Permanenz sichergestellt wird.

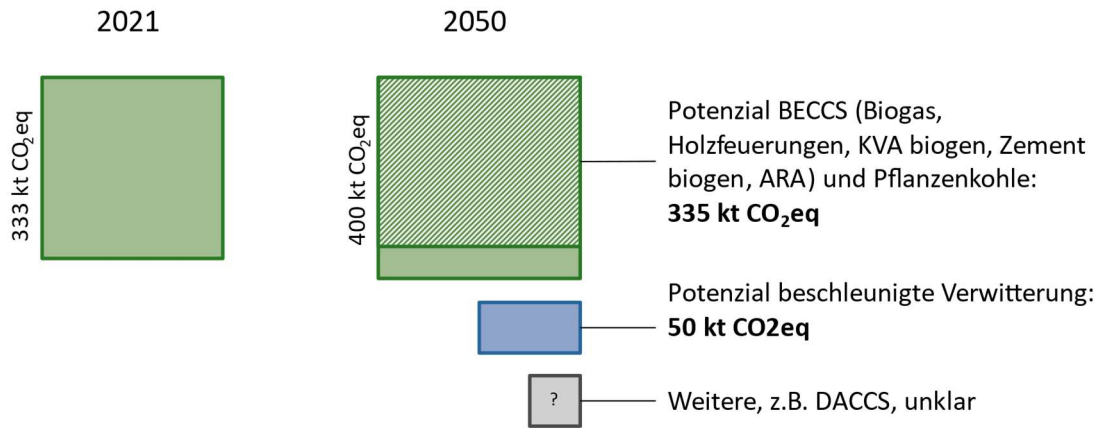
Neben dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen kann allenfalls auch die beschleunigte Gesteinsverwitterung ein wesentliches CDR-Potenzial aufweisen. Abschätzungen zu solchen Potenzialen gehen weit auseinander, unter der Berücksichtigung aufwändiger Transportlogistik und einem beschränkten Abbau des benötigten Gesteins in der Schweiz erscheint ein Potenzial von maximal 50 kt CO<sub>2</sub> realistisch. Der notwendige Abbau und die landwirtschaftliche Ausbringung von grossen Gesteinsmengen könnten jedoch durch eine fehlende gesellschaftliche Akzeptanz im Kanton deutlich eingeschränkt sein. Somit könnten im besten Fall die Restemissionen komplett ausgeglichen werden. Weiterhin könnten auch ausserhalb der Kantons-grenzen (z.B. über DACCS Anlagen in Ländern mit Energieüberschuss) oder durch gezielten Ausbau anderer Technologien noch Potenziale für CDR genutzt werden.

Grundsätzlich ist der Kanton durch die Verfügbarkeit von zwei Zementwerken und der KVA im Vergleich zu anderen Kantonen gut positioniert, seine Restemissionen bis 2050 weitgehend durch lokalen CDR auszugleichen.

---

<sup>26</sup> Für Herleitung der zusätzlichen 65 kt CO<sub>2</sub>eq, siehe Kapitel 3.1.5.

Abbildung 5: Total Emissionen aus Biomasse und CDR-Potenziale 2050



Die grünen Quadrate repräsentieren die insgesamt durch Biomasse entstehenden Emissionen und dadurch CDR-Potenziale. Grün schraffiert sind die Potenziale durch BECCS und Pflanzenkohle angegeben. In Blau das Potenzial durch beschleunigte Gesteinsverwitterung. Weitere Potenziale könnten sich durch DACCS oder andere Technologien ergeben, jedoch kaum innerhalb der territorialen Grenzen des Kantons.

Grafik INFRAS.

### 3.2.3. Gesamtpotenzial und Gegenüberstellung der Technologien

Durch die Anwendung von CCS bei Zementwerken und der KVA, Pflanzenkohle und beschleunigter Gesteinsverwitterung ergibt sich für den Kanton Aargau ein Reduktionspotenzial (der Emissionen) von rund 500 kt CO<sub>2</sub>eq und ein CDR-Potenzial (Entnahme aus der Atmosphäre) von rund 385 kt CO<sub>2</sub>eq. Basierend auf den prognostizierten Restemissionen von rund 870 kt CO<sub>2</sub>eq ist davon auszugehen, dass der Kanton das Potential hat, um von der Grössenordnung her die gesamten Restemissionen auszugleichen. Grundsätzlich sind jedoch alle diese Abschätzung mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Des Weiteren gibt es an vielen Stellen Spielraum und Stellschrauben, um die Potenziale möglichst optimal auszunutzen. Die folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen hier betrachteten Technologien und die Potenzialschätzungen.

Tabelle 1: Übersicht CCS- und CDR-Technologien und Schätzwerte



Technologie	CCS Zement	CCS KVA	CCS ARA	BECCS	Pflanzenkohle	Beschl. Verwitterung	DACCS
Reduktionspotenzial [kt CO <sub>2</sub> eq]	350	150					
CDR-Potenzial [kt CO <sub>2</sub> eq]	335 (in der Summe)					50	gering (in AG)
Kosten im Jahr 2050 [CHF / t CO <sub>2</sub> ]	160-190	150-200	150-200	150-200	10-30	75-170	250
Energiebedarf* [MWh / t CO <sub>2</sub> eq]	0.8	1.1**	1.1**	1.1**	energiepositiv	0.05-0.43	1.9-2.5
Permanenz [Jahre]	> 1'000	> 1'000	> 1'000	> 1'000	<100 bis > 1'000***	> 1'000	> 1'000
Unsicherheit****	<i>mittel</i>	<i>mittel</i>	<i>mittel</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>	<i>mittel</i>

\* Für die Anwendungen von CCS bezeichnet der Energiebedarf nur die CCS-Technologie selbst. Bioenergie und KVA sind mit CCS-Anwendung auch insgesamt energiepositiv.

\*\* Ein beträchtlicher Teil dieser Energie kann durch die Anlage selbst, an der CCS eingesetzt wird, gedeckt werden. Der genaue Anteil hängt jedoch von der Grösse der Punktquelle und der Energieeffizienz der Anlage ab. Der Energiebedarf für CCS erhöht jedoch damit den Bedarf an erneuerbaren Energien (Brennstoff, Strom) respektive reduziert das Potential zur Energielieferung an die Fernwärme.

\*\*\* Stark abhängig von der Produktions- und Verwertungsbedingungen (siehe entsprechendes Faktenblatt).

\*\*\*\* Die Angaben zur Unsicherheit beruhen auf einer Einschätzung von INFRAS, basierend auf dem aktuellen Forschungsstand, Anwendungspraxis, Abhängigkeit von externen Faktoren und technologischer Reife.

Weitere Informationen zu den Technologien und der Einschätzung von Potenzialen, Kosten und Energiebedarf finden sich in den Faktenblättern.

Wichtige Grundannahmen für die Zahlen sind: Pipeline Netzwerk und Logistik vorhanden; CCS Grundsätzlich ab Punktquellen > 50kt CO<sub>2</sub> / Jahr, vereinzelt kleinere mit Subventionen möglich; CCS-Abscheidungseffizienz von 90%; CO<sub>2</sub>-neutrale Wertschöpfungsketten, verfügbare Biomasse +20% im Vergleich zu 2021.

Die Annahmen sind grundsätzlich optimistisch und die Unsicherheiten sehr gross.

Tabelle INFRAS. Grafiken, basierend auf Minx et al. (2017).

### 3.2.4. Technologien mit geringer Relevanz für den Kanton Aargau

#### **Boden- und Waldbewirtschaftung, Holzbau**

Eine Massnahme, die häufig unter CDR aufgeführt wird, ist die Erhöhung der Kohlenstoffsinken in Böden und in der Vegetation (in Wäldern). Studien haben für die Schweiz teils erhebliche Potenziale für Wald- und Bodenbewirtschaftung ausgewiesen.<sup>27</sup> Ein Teil dieses Potenzials in Form von höheren Holzerträgen hat sich auch im CDR-Potenzial durch Energieholz niedergeschlagen (siehe Kapitel 3.1.5, Kapitel 3.2.2 sowie Faktenblättern BECCS, Pflanzenkohle, CCS-Zement und CCS KVA).

Für den Aufbau von über- und unterirdischen Kohlenstoffspeichern wurde hier jedoch kein Potenzial ausgewiesen. Der Grund dafür ist, dass selbst bei einer bewiesenen Wirksamkeit der Bewirtschaftungsmassnahme, eine Permanenz von >100 Jahren oder nur schon >10 Jahren nicht gewährleistet werden kann. Dieses Problem wird durch die Tatsache verschärft, dass der Klimawandel die bestehenden Waldbestände teilweise gefährdet und sich negativ auf Kohlenstoffsinken in Waldbiomasse und im Boden auswirken könnte.<sup>28</sup>

Auch vermehrter Holzbau wird häufig als wichtige CDR-Massnahme ausgewiesen. Grundsätzlich erscheint es naheliegend, dass beim Verbau von Holz in Gebäuden langfristig CO<sub>2</sub> gespeichert wird und dies daher als CDR anzusehen ist. Hinzu kommt, dass durch den Einsatz von Holz der Anteil Zement und dadurch der Fussabdruck von Gebäuden weiter reduziert werden kann. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, wie viel der Anteil Holz im Vergleich zu heute in Gebäuden tatsächlich noch erhöht werden kann (aus ökonomischen, statischen, und weiteren Gesichtspunkten). Aus Klimabilanzsicht sollte dieser Anteil generell so rasch wie möglich, beziehungsweise bereits vor 2050 maximiert werden. Unter dieser Annahme wäre 2050 der Baubereich in einem Gleichgewicht, in dem etwa gleich viel Holz verbaut würde, wie bei Ersatzneubauten wieder aus der Bausubstanz entfernt wird. Somit könnte 2050 kaum noch zusätzliche Speicherkapazität von CO<sub>2</sub> in Bauten erzielt werden.

Dazu kommt, dass Gebäude in der Regel keine Permanenz von >1'000 Jahren aufweisen und somit «nur» als Zwischenspeicher dienen würden. Es ist daher wichtig, dass das Altholz aus dem Bau im Sinne der Kaskadennutzung effizient einer Verwertung durch BECCS oder wo möglich Pflanzenkohle zugeführt wird. Auch diese Potenziale durch BECCS oder Pflanzenkohle dürften jedoch kaum zusätzlich zu den bereits oben abgeschätzten Potenzialen sein, da das verfügbare Energieholz im Kanton allein den Bedarf an Biomasse nicht decken kann. Insofern würde

<sup>27</sup> Brunner C., Knutti R. (2022). Potenziale und Kosten der CO<sub>2</sub>-Entfernung in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern.

<sup>28</sup> Soong et al. (2021): Five years of whole-soil warming led to loss of subsoil carbon stocks and increased CO<sub>2</sub> efflux. Science Advances.

das Altholz dazu führen, die in Kapitel 3.2 beschriebenen Potenziale, insbesondere durch CCS im Zementsektor überhaupt ausschöpfen zu können.

### **Ozeane**

In internationalen Studien wird auch das Ozeanmanagement als Möglichkeit für CDR erwähnt.<sup>29,30</sup> Dazu gehört beispielsweise die Alkalinisierung des Meeres durch Einbringen von Kalk- oder Silikatgesteinen, oder das Düngen der Ozeane zur Beschleunigung des Algenwachstums und dadurch der Bindung von CO<sub>2</sub> durch Fotosynthese. Im Zuge dieser Studie wurde diesen Themen jedoch keine Bedeutung beigemessen, da sie für den Kanton Aargau und die Schweiz unter territorialen Gesichtspunkten nicht relevant sind und auch sonst von allen CDR-Technologien die höchsten Unsicherheiten und geringste technologische Reife aufweisen.

## **3.3. Herausforderungen Logistik und Infrastruktur CCS**

Die Anwendung von CCS erfordert eine aufwändige Logistik und Infrastruktur, um die grossen Mengen an CO<sub>2</sub> abzuscheiden und anschliessend an langfristige Speicherorte zu bringen. Es ist zu erwarten, dass diese zu einem grossen Teil im Ausland liegen dürften (siehe Kapitel 3.1.3). Von der Abscheidung über Transport bis zur Lagerung bestehen zum Teil hohe Hürden, die überwunden werden müssen, um die Potenziale von CCS auszuschöpfen.

### **Abscheidung**

Für einzelne Punktquellen ist das Errichten von CCS-Anlagen zumeist kein Problem der Infrastruktur, sondern eher der Investitionskosten. Jedoch brauchen auch CCS-Anlagen Platz und so kann es vorkommen, dass ganze Werke umgebaut oder neugebaut werden müssten, um eine effiziente Abscheidung durch CCS zu gewährleisten (Aussage aus Interview). Die Abscheidung benötigt auch sehr viel erneuerbare Energie, welche lokal zur Verfügung gestellt werden muss. Ebenfalls kann es aus ökonomischen Gründen teilweise sinnvoll sein, Werke zu zentralisieren, um eine grössere absolute Punktquelle der Emissionen zu erreichen.

### **Transport**

Ebenfalls eine grosse Herausforderung ist die Transportinfrastruktur für das abgeschiedene CO<sub>2</sub>. Der notwendige Aufbau einer umfassenden Infrastruktur quer durch Europa ist ein limitierender Faktor zum Erreichen hoher Abscheidungsraten von CO<sub>2</sub>. Selbst wenn heute flächendeckend CCS-Anlagen gebaut würden, könnte ohne ein Pipelinennetzwerk in Richtung Nordsee nur

<sup>29</sup> IPCC (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

<sup>30</sup> Minx et al. (2018): Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. Environmental Research Letters.

ein kleiner Teil des CO<sub>2</sub> überhaupt abtransportiert werden. Die Kapazitäten über Schiene, Strasse und Wasser (Rhein) sind limitiert und nicht auf Grössenordnung mehrerer 100'000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr ausgelegt, die allein durch den Kanton Aargau im Jahr 2050 abtransportiert werden müssten.

Der Bau einer grossen Transportinfrastruktur dürfte auch auf Akzeptanzfragen stossen. Aus einer undichten Pipeline austretendes CO<sub>2</sub> kann ein Gesundheitsrisiko darstellen.

Ein robustes Pipelinenetzwerk ist eine Grundvoraussetzung für das Ausschöpfen der Potenziale des Kantons und auch der Schweiz. Es wurden bereits Studien für ein solches Pipelinenetzwerk durchgeführt, unter der Berücksichtigung, dass alle Punktquellen >100kt CO<sub>2</sub>eq abgeschlossen sind.<sup>31,32</sup> Aktuell bestehen jedoch hohe Unsicherheiten, ob und bis wann ein solches Netzwerk von welchen Akteuren umgesetzt wird. Der Kanton Aargau liegt grundsätzlich geografisch günstig für eine Anbindung an eine solche Infrastruktur, die das CO<sub>2</sub> in Richtung Nord-europa transportieren soll.

### **Geologische Lagerung und CO<sub>2</sub>-Aufnahme von Abbruchzement**

Zurzeit ist nicht absehbar, dass die Schweiz und der Kanton Aargau über die notwendigen, praktisch nutzbaren Lagerstätten verfügen, um die gemäss der nationalen und kantonalen Klimastrategien notwendige Menge an CO<sub>2</sub> geologisch speichern zu können (siehe Kapitel 3.1.3). Daher dürfte die Lagerung im Ausland notwendig sein (und damit auch das Pipelinenetzwerk, wie oben beschrieben). Global betrachtet sind hinreichend Lagerstätten verfügbar<sup>33</sup>, die Nutzung derselben erfordert jedoch internationale Verträge. Dies könnte zu neuen Abhängigkeiten vom Ausland, einerseits gegenüber Durchführländer (insbesondere Pipelines), andererseits gegenüber Ländern mit Lagerstätten führen. Weiterhin könnte die Lagerung durch die global steigende Nachfrage in Zukunft anspruchsvoller bzw. teurer werden. Noch ist jedoch nicht absehbar, wie sich der Markt entwickeln wird.

Eine Möglichkeit der Speicherung wird bereits heute in der Schweiz in Pilotprojekten eingesetzt, in dem Abbruchzement mit abgedichtetem CO<sub>2</sub> begast wird und diesen aufnimmt.<sup>34</sup> Im Grunde ist dies die Beschleunigung eines natürlichen Prozesses, da Zement über lange Zeiträume von selbst einen Teil des während der Herstellung emittierten CO<sub>2</sub> wieder aufnimmt. Das Potenzial dieser Technologie ist jedoch sehr begrenzt und kann nur einen Bruchteil des abzuscheidenden CO<sub>2</sub><sup>35</sup> speichern.

<sup>31</sup> Saipem (2020): CO2NET Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO2 Sammel-Netzwerk in der Schweiz. BFE

<sup>32</sup> Albicker (dena) & Eichler (BAK), et al. (2023), «Carbon Capture & Storage (CCS) – Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050». Dena und BAK im Auftrag des BAFU.

<sup>33</sup> Die IEA schätzt eine globale Speicherkapazität von 8-55 Billionen t CO<sub>2</sub>. Siehe online: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>

<sup>34</sup> Siehe zum Beispiel: <https://www.neustark.com/de>

<sup>35</sup> Maximal 50-100kt CO<sub>2</sub> für die gesamte Schweiz, was rund 0.5-0.9% der geschätzten Restemissionen der Schweiz 2050 entspricht. Siehe: [aeesuisse WiBe CCS Position 24060859.pdf](https://www.aeesuisse.ch/WiBe_CCS_Position_24060859.pdf).

### 3.4. Potenziale der Weiterverwendung von CO<sub>2</sub> (CCU)

Neben der Möglichkeit, CO<sub>2</sub> direkt langfristig zu speichern, kann dieses nach dem Abscheiden auch wiederverwendet werden, beispielsweise als Basis für die Synthetisierung von Basische-mikalien oder synthetischen Brenn- und Treibstoffen (Synfuels) in Kombination mit grünem Wasserstoff. In diesem Fall spricht man von Carbon Capture and Utilization (CCU). Dies kann ebenfalls zu einer Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, falls sichergestellt ist, dass am Ende der Nutzung des Kohlenstoffs eine erneute Abscheidung und dauerhafte Speicherung erfolgt. Allgemein führt CCU selbst noch nicht zu CDR. Der Einsatz von reinem CO<sub>2</sub> innerhalb der Kantongrenzen ist jedoch stark beschränkt auf die Getränkeindustrie, welche Kohlensäure im Umfang von deutlich weniger als 1 kt CO<sub>2</sub> pro Jahr benötigt<sup>36</sup>.

Beim Einsatz von CO<sub>2</sub> für Power-to-X in der Herstellung synthetischer Kraftstoffe oder Basische-mikalien ist der Bedarf an erneuerbarem Strom jedoch enorm hoch (selbst wenn die Abscheidung nicht mitberücksichtigt wird)<sup>37</sup>. Auf Basis heutiger Erkenntnisse ist dies in der Schweiz kaum skalierbar, da der erneuerbare Strom für andere Anwendungen gebraucht wird. Möglicherweise kann CO<sub>2</sub> in Zukunft an Orte mit Energieüberschuss (Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung) transportiert, dort in synthetische Brennstoffe umgewandelt und anschließend wieder an Orte mit Energiedefizit gebracht werden. Hierzu wären internationale Abkommen und wiederum eine entsprechende Transportlogistik notwendig. Dies würde wiederum zu entsprechenden politischen bzw. wirtschaftlichen Abhängigkeiten gegenüber Produktions- und Durchfuhrländern führen.

---

<sup>36</sup> Feldschlössen benötigt unter der Annahme der Produktion von rund 100'000 hl Bier und einem Durchschnittsgehalt von rund 4g CO<sub>2</sub> / l etwa 40 t CO<sub>2</sub> pro Jahr.

<sup>37</sup> Sterner & Stadler (Hrsg.) (2017): Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration. 2. Auflage, Berlin Heidelberg.

## 4. Bedürfnisse der Unternehmen

Um die Klimastrategie des Kantons Aargau umsetzen und die ambitionierten Reduktions- und CDR-Potenziale tatsächlich ausschöpfen zu können, müssen die aktuell grossen Treibhausgasemittenten gut in den Prozess eingebunden sein. Daher ist es dem Kanton Aargau wichtig, die Hindernisse, Herausforderungen und Bedürfnisse, die sich durch die zu erfüllenden Reduktionsanforderungen ergeben, bei den betroffenen Unternehmen abzuholen.

Dafür wurden im Dezember 2024 zuerst drei Interviews mit Unternehmen aus relevanten Industrien geführt. Diese lieferten neben Inputs zu den Kapiteln 2 und 3 auch erste Hinweise auf Hindernisse und Bedürfnisse, welche in einem Workshop im Februar 2025 vertieft wurden.

Die in diesem Kapitel dargelegten Informationen widerspiegeln primär die Sicht der beteiligten Unternehmen und entsprechen nicht zwingend der Einschätzung von INFRAS oder dem Kanton Aargau.

### 4.1. Hindernisse und Herausforderungen

#### **Kosten und finanzielle Aspekte**

Fast alle Teilnehmer sehen die hohen Kosten von CCS- resp. CDR-Massnahmen als grösstes Hindernis für die Umsetzung. Dabei geht es vor allem um die fehlende Möglichkeit, die Investitionen in solche Technologien wieder zu monetarisieren. Aktuell erscheint es nicht möglich, die zusätzlichen Kosten, die sich durch Abscheidungstechnologien ergeben, auf die Kundschaft umzuwälzen. Der Markt für CCU, resp. die Weiterverwendung von CO<sub>2</sub>, ist aktuell noch klein und dürfte nicht ausreichend zur Lösung des Problems beitragen.

Zwar stehen aktuell und in den nächsten Jahren gesamthaft Fördermittel von über CHF 1 Mrd. zur Verfügung, insbesondere durch das KIG<sup>38</sup>. Diese werden jedoch von den Teilnehmern des Workshops als nicht hinreichend empfunden. Dies insbesondere, weil die Fördermittel nicht die anhaltenden OpEX-Kosten von CCS decken können. Letztlich ergeben sich auch «First-mover»-Nachteile, da eine frühe Investition, in die sich noch stark entwickelnde Technologie, ein Nachteil sein kann. Auch im internationalen Kontext ist die Schweiz durch den fehlenden Grenzschutzmechanismus CBAM<sup>39</sup> im Nachteil, der in der EU gewisse Industriesektoren bei den zukünftig höheren Kosten für den Klimaschutz inkl. CCS vor dem billigeren Import aus Ländern ohne Emissionshandelssystemen schützt. Mögliche Lösungen wären hier ein Schweizer Grenzschutzmechanismus analog zum CBAM, oder die Vorgabe von Schweizer Produktstandards (z.B. zum maximalen CO<sub>2</sub>-Fussabdruck von Zement). Bei KVA dürften die CCS-Kosten wohl durch höhere Abfallgebühren zu tragen sein.

<sup>38</sup> Siehe: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2022/2403/de>

<sup>39</sup> Siehe: [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en?prefLang=de](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en?prefLang=de)

### **Logistik, Transport & Speicherung**

Die bereits in Kapitel 3.3 dargelegten Herausforderungen bei Transport und Logistik werden auch von den betroffenen Unternehmen genannt. Hier wird vor allem eine fehlende Planungssicherheit hervorgehoben, sowie die Einschätzung, dass die Herausforderungen Pipelinennetzwerk nicht hinreichend von der öffentlichen Hand (v.a. Bund) geplant und angepackt würde.

In diesem Zusammenhang wurde auch die gesellschaftliche Akzeptanz von Projekten im Bereich CO<sub>2</sub>-Transport – und Speicherlogistik genannt. So besteht häufig noch eine grosse Unsicherheit, die in der Vergangenheit regelmässig in Protesten und Widerstand gegen ähnliche Projekte durch die Bevölkerung resultierte.

### **Energie- und Biomasseverfügbarkeit**

Insbesondere die Abscheidungstechnologien für CCS/CCU sind sehr energieintensiv und benötigen entweder zusätzliche Energie in Form von Strom und Wärme oder verringern den Wirkungsgrad der bestehenden Energiebereitstellung an der entsprechenden Punktquelle um bis zu 20%. Aktuell erscheint noch unklar, wie genau diese zusätzliche Energie bereitgestellt werden kann.

Ähnliches gilt für die verfügbare Biomasse, welche für die Anwendungen BECCS (Holzfeuerungen und Biogas), Zementfeuerungen und die Herstellung von Pflanzenkohle benötigt wird. Die vorhandene Menge an Energieholz und anderen biogenen Rohstoffen im Kanton ist begrenzt und der Import birgt grosse Risiken, dass das Holz nicht aus nachhaltigen Quellen stammt. Insofern ist heute unklar, ob und wie stark die Potenziale in den genannten Technologien tatsächlich ausgeschöpft werden könne.

### **Unklare Rahmenbedingungen und fehlende Planungssicherheit**

Hierbei wurden verschiedene Aspekte genannt, wie regulatorische, finanzielle und technologisch Rahmenbedingungen, sowie die globale Wettbewerbssituation (für international agierende Unternehmen). All diese Faktoren erschweren eine robuste Planung für die strategische Umsetzung und Investition insbesondere in CCS-Technologien.

## **4.2. Bedürfnisse**

Basierend auf den oben genannten Hindernissen und Herausforderungen wurden verschiedene Bedürfnisse und Handlungsfelder erarbeitet und anschliessen von den Teilnehmern des Workshops nach Relevanz eingeordnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 nach Priorität sortiert dargestellt.

**Tabelle 2: Wichtigste Bedürfnisse für die grossen Emittenten und weitere Stakeholder im Kanton Aargau**

Bedürfnis / Handlungsfeld	Priorität
Eine solidarische Finanzierung der Mehrkosten für den Einsatz von CCS-Technologien respektive CDR-Massnahmen, insbesondere im Bereich KVA. Dies sowohl auf Branchenebene (z.B. die KVA finanzieren gemeinsam ein Pilotprojekt), als auch auf gesellschaftlicher Ebene (die Abfallverursacher zahlen einen höheren Preis für den Verwertung inkl. CCS).	1. Prio
Eine klare Roadmap zur CO <sub>2</sub> -Transport- und Speicherungsinfrastruktur (Pipelinenetzwerk) von Seiten des Bundes bzw. des Kantons um die Planungssicherheit dahingehend zu gewährleisten.	
Weitere Grundlagen und Koordinationsarbeit vom Bund, möglicherweise auch eine verstärkte zentralisierte Planung.	
Mehr und bessere Förderung, um die Anzahl an Pilotprojekten zu erhöhen.	2. Prio
Angemessener Einbezug von Scope 3-Emissionen und Aspekten der Kreislaufwirtschaft und Biodiversität bei der Beurteilung von Produkten und Technologien.	
Import synthetischer Energieträger, um die Energiebereitstellung (inkl. CCS-Bedarf) zu sichern.	3. Prio
Verstärktes Einwirken des Kantons auf den Bund (u.a. um die oben genannten Punkte zu erwirken).	

Tabelle INFRAS. Quelle: Teilnehmer des Workshops vom 13. Februar 2025 in Aarau.

### 4.3. Fazit zur Sicht der Unternehmen

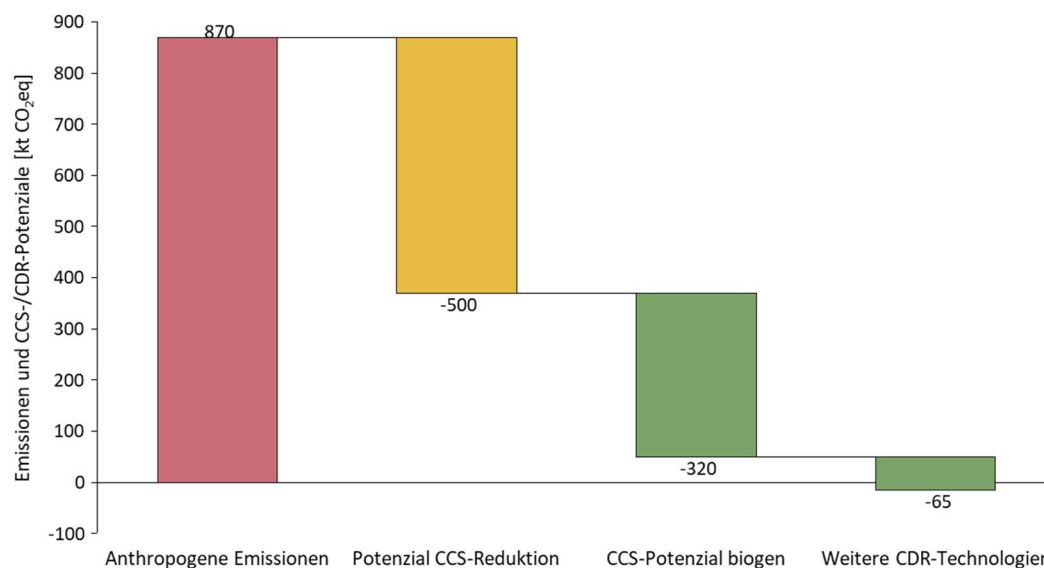
Aktuell gibt es eine Vielzahl von Hürden und Hindernissen, welche die Unternehmen im Kanton Aargau an einer (raschen) Umsetzung von Massnahmen im Bereich CCS und CDR abhält. Trotz allem wird das Erreichen von Netto-Null bis 2050 im Kanton Aargau überwiegend als realistisch betrachtet. Auf einer Skala von 1-5 (gar nicht optimistisch – sehr optimistisch), ob Netto-Null erreicht werden kann, votierten die Teilnehmer des Workshops sehr ausgeglichen mit einem Durchschnittswert von gut 3. Der Weg dorthin wird trotzdem als sehr anspruchsvoll und unsicher wahrgenommen. Entsprechend ist es aus Sicht der Unternehmen schnelles und konstruktives Handeln gefragt, insbesondere, was die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Themen anbelangt. Die breite und interessierte Beteiligung der Unternehmen am Workshop deutet darauf hin, dass die Themen Netto-Null, CCS und CDR bei den Unternehmen einen relativ hohen Stellenwert haben.

## 5. Fazit und Empfehlungen

### 5.1. Netto-Null 2050 mit CCS und CDR-Potenzial Im Kanton grundsätzlich machbar

Die prognostizierten Restemissionen des Kantons Aargau im Jahr 2050 liegen bei rund 870kt CO<sub>2</sub>eq. Gleichzeitig schätzen wir optimistische Reduktionspotenziale durch CCS-Technologien von rund 500kt CO<sub>2</sub>eq und CDR-Potenziale durch CCS und weitere Technologien von rund 385kt CO<sub>2</sub>eq (siehe Abbildung 6). Somit hat der Kanton Aargau ein realistisches, wenn auch mit diversen Herausforderungen versehenes Potenzial, Netto-Null 2050 zu erreichen.

**Abbildung 6: Restemissionen 2050, CCS-Reduktionspotenziale und CDR-Potenziale Kanton Aargau**



Grafik INFRAS.

Grundstein dafür ist in erster Linie eine konsequente Vermeidung und Reduktion bestehender Emissionen. Die landwirtschaftlichen Emissionen sind hier hervorzuheben, da sie 2050 noch über 25% der bestehenden Restemissionen ausmachen, jedoch im Gegensatz zu den beiden grössten Emissionsquellen KVA und Zement kaum Potenziale für CCS bieten.

Die Unsicherheiten sind in allen Bereichen (noch) sehr gross und können in den kommenden Jahren zu deutlichen Verschiebungen bei den Restemissionen, wie auch bei den Potenzialen und Kosten führen. Stand heute gehen wir davon aus, dass die hauptsächlichen Potenziale bei CCS Zement und CCS KVA sowie bei Bioenergie (BECCS) liegen. Weitere Technologien können im Kanton oder auch ausserhalb (DACCS) unterstützen. Der Energiebedarf für CCS dürfte

sehr hoch sein und geht allenfalls einher mit verminderten Wirkungsgraden bei BECCS und Fernwärmeverfügbarkeit. Im optimistischen Fall werden die Kosten im Jahr 2050 bei durchschnittlich 200 CHF/t CO<sub>2</sub> liegen. Voraussetzung für diese tiefen Kosten sind frühe und grosse Investitionen in die Technologien, ein regulatorischer Rahmen für eine langfristige finanzielle Absicherung und ein europäisches Pipelinennetzwerk für den Transport von CO<sub>2</sub>. Zudem muss eine Kostenabwägung zwischen weiterer Reduktion (insbesondere in der Landwirtschaft), CCS und CDR vorgenommen werden.

## 5.2. Zentrale Herausforderungen für Netto-Null im Kanton Aargau

Um die Restemissionen tatsächlich auf das angestrebte Niveau bringen zu können, und die Potenziale für CCS und CDR ausschöpfen zu können, müssen eine Reihe grosser Herausforderungen überwunden werden. Dazu gehören:

- **Kosten:** Auch wenn die Kosten der einzelnen Technologien pro Tonne vermiedenen oder negativem CO<sub>2</sub> auf den ersten Blick relativ tief erscheinen (siehe Faktenblätter, sowie Tabelle 1), so sind diese doch mit enorm hohen initialen Investitionen verbunden, die bereits zeitnah getätigt werden müssen. Nur so kann die notwendige technologische Entwicklung, Infrastruktur und Skalierung erreicht werden, die den Kostenschätzungen als Annahmen zugrunde gelegt wird. Private Unternehmen können solche Kosten nur stemmen, wenn der rechtliche Rahmen durch Bund und Kantone die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit langfristig sicherstellt (u.a. durch Regulierung, Subventionen, etc.).
- **Transport- und Lagerlogistik:** Diese bedarf aufgrund der Notwendigkeit eines europäischen Pipelinennetzwerks ebenfalls hoher Investitionen sowie einem erheblichen Mass an Koordination zwischen den Akteuren Unternehmen, Kanton und Bund sowie mit dem Ausland.
- **Verfügbare Energie und Biomasse:** Die notwendige Energie, insbesondere für CCS-Technologien ist hoch (rund 1 MWh / t CO<sub>2</sub>) und kann den Wirkungsgrad der Anlagen und damit auch beispielsweise die Bereitstellung von Fernwärme negativ beeinträchtigen. Auch die notwendige Biomasse um die Potenziale durch BECCS (KVA, Zement, Holzfeuerungen, Biogas) und Pflanzkohle auszuschöpfen könnte die Ressourcen innerhalb des Kantons übersteigen.
- **Scope 3 Emissionen:** Auch wenn für die Klimastrategie des Kantons Aargau das Territorialprinzip zur Anwendung kommt, so müssen die (materialintensiven) Lieferketten der CCS- und CDR-Technologien trotzdem weitestgehend CO<sub>2</sub>-neutral sein, um die Potenziale tatsächlich auszuschöpfen. Dies ist besonders kritisch, da der Kanton hierbei nur begrenzt Einflussmöglichkeiten hat und diese Scope 3 Emissionen von vielen externen Faktoren abhängen.

### 5.3. Empfehlungen und Handlungsvorschläge INFRAS

Das Netto-Null Ziel ist ambitioniert und die Potenziale für CCS und CDR sind trotz teils sehr optimistischen Annahmen nur knapp ausreichend, um die prognostizierten Restemissionen vollständig zu reduzieren und auszugleichen. Daher ist es wichtig, dass der Kanton sich innerhalb seiner Kompetenz einsetzt für eine rasche und entschlossene Umsetzung von griffigen Reduktionsmassnahmen sowie baldige erste Schritte für die Umsetzung von CCS- und CDR-Technologien.

Für die Verwaltung des Kantons Aargau bestehend aus unserer Sicht folgende (konkrete) Handlungsvorschläge:

- **Pilotprojekte fördern:** Über die bestehenden Aktivitäten des Bundes hinaus kann der Kanton Aargau Pilotprojekte im Kanton Aargau gezielt fördern, um die Anwendung von CCS- und CDR-Technologien zu testen, damit Betreiber, Stakeholder und der Kanton Erfahrungen sammeln können und um die Skalierung zu beschleunigen. Empfohlen wird bei diesen Pilotprojekten eine Zusammenarbeit mit dem Bund, mit weiteren interessierten Kantonen, Zweckverbänden sowie mit der Industrie.
- **Finanzierungsmöglichkeiten und Machbarkeit prüfen:** Die Finanzierung von CDR ist eine spezielle Herausforderung, da die Anwendungen in der Regel v.a. mit Kosten verbunden sind und neben der CO<sub>2</sub>-Speicherung keinen weiteren wirtschaftlichen Nutzen aufweisen. Verschiedene Finanzierungsmöglichkeiten für verschiedene Branchen und Use Cases ausloten (ggf. im Zusammenhang mit den Pilotprojekten) und Machbarkeitsstudien für ausgewählte Projekte durchführen.
- **Strategische Überlegungen zur (optimalen) künftigen Biomassenutzung anstellen:** Die Verfügbarkeit von Biomasse wird in Zukunft aus verschiedenen Gründen wichtig sein: Biomasse wird für das Energiesystem, für CDR (BECCS, Pflanzenkohle) und bei der stofflichen Verwertung (z.B. Holzbau) eine entscheidende Rolle spielen. Insbesondere bei CDR ist der überwiegende Anteil des Potenzials von der Biomasse abhängig. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die im Jahr 2050 verfügbare Biomasse knapp sein wird. Der Kanton Aargau sollte sich deshalb auf strategischer Sicht damit auseinandersetzen, wie Biomasse (optimal) genutzt werden soll (ergänzend und vertiefend zur Energiestrategie). Für ein allfälliges Strategiepapier sind Überlegungen / Ziele des Bundes und der umliegenden Kantone zu berücksichtigen.
- **Spielraum in der kantonalen Gesetzgebung prüfen:** Der Kanton kann prüfen, wo er innerhalb seiner Kompetenzen die Rahmenbedingungen für CCS/CDR durch gesetzliche Grundlagen verbessern kann (z.B. Abfallverwertung, Raumplanung, finanzielle Unterstützung). Auch diesbezüglich kann sich ein Austausch mit anderen Kantonen lohnen.
- **Auf Rahmenbedingungen des Bundes einwirken:** Der Kanton kann sich im Dialog mit dem Bund für seine Interessen einsetzen, z.B. wenn es um Gesetze und Verordnungen rund um

CCS/CDR geht (Vernehmlassungen, Arbeitsgruppen, etc.) und auch bezüglich der Planung und Umsetzung von Infrastruktur wie einem allfälligen Pipelinenetzwerk.

- **Austausch stärken:** Die Umsetzung von CCS- und CDR-Anwendungen muss rasch vorangetrieben werden, betrifft verschiedene Branchen und Akteure (kantonal, national und international) und benötigt grosse Investitionen. Entsprechend wichtig ist ein regelmässiger Austausch mit den betroffenen Stakeholdern, um Chancen/Synergien zu nutzen, Zielkonflikte zu berücksichtigen und die Aktivitäten koordiniert voranzutreiben. Dafür können (bedarfsgerechte) Austauschgefässe mit der Industrie und ggf. mit weiteren Akteuren geschaffen werden und das Engagement in bestehenden Gefässen (z.B. nationale CCS-Arbeitsgruppe) verstärkt werden.
- **Systemgrenzen erweitern:** Der Einbezug von Scope 3 (vor- und nachgelagerte) Emissionen, welche ausserhalb der Kantonsgrenzen anfallen, ermöglicht ein gesamtheitliches Bild bei der Beurteilung der Wirksamkeit der CCS- und CDR-Technologien. Die verfügbaren Daten zu Scope 3 Emissionen sind heute oft noch mit Unsicherheiten verbunden. Das tatsächliche Potenzial durch CCS-Technologien und CDR kann jedoch durch Scope 3 Emissionen erheblich beeinträchtigt sein.
- **Regelmässiges Monitoring und Reporting:** Transparenz zu CCS und CDR in den kantonalen Emissionskatastern schaffen. Dazu gehören unter anderem Informationen zur Quantität, ob es sich um Reduktion durch CCS oder CDR handelt, Permanenzabschätzungen und zur Endlagerung.<sup>40</sup> In der Folge wird ein kontinuierliches Monitoring der Emissionsentwicklung im Kanton, der technologischen Entwicklung rund um CCS/NET sowie der verbundenen Kosten und internationalen Rahmenbedingungen notwendig sein, um rasch und umsichtig auf für den Kanton Aargau relevante Entwicklungen reagieren zu können. Für die Entwicklung von preiswerten und skaliert verfügbaren Technologien wird nicht nur der Schweizer Markt, sondern insbesondere die Entwicklung im Rahmen des «Green Deal» in der EU und die zunehmende Marktführerschaft von China in grünen Technologien relevant sein. In der Regel finden technologische Entwicklungen in Sprüngen und mit schwer vorhersehbaren Schritten statt, so dass sich die Situation innerhalb weniger Jahre stark verändern kann. Umso wichtiger ist es daher, ein effizientes und umfassendes Monitoring aufrechtzuerhalten, welches eine schnelle Reaktion auf solche Sprünge ermöglicht.

---

<sup>40</sup> Siehe «Arbeitshilfe Kantonale Treibhausgasbilanzen» des Cercle Climat, welches sich aktuell im Vernehmlassungsprozess befindet.