

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau
CCS und CDR Perspektiven Aargau
Faktenblatt DACCS

Zürich, 27. Juni 2025

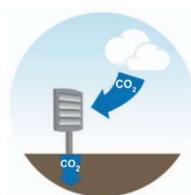
Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
gering	250	1.9-2.5	> 1000 Jahre mög- lich	CDR

Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen.



Grafik: Minx et al. (2017).

Beschreibung

Bei Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCs) handelt es sich um die CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre. Im Gegensatz zur Abscheidung an einer grossen Punktquelle (z.B. dem Kamin einer Industrieanlage), bei welcher CO₂ zumeist hoch konzentriert ist, ist dies bei Luft nicht der Fall. Die Konzentration beträgt hier lediglich ca. 420 ppm (0.04%). Bei tieferer Konzentration wächst der Energieaufwand und die damit verbundenen Kosten, um das CO₂ aus dem Medium zu filtern. Der Vorteil von DACCs ist, dass die Technologie örtlich flexibel und nicht an die Emissionsquellen gebunden ist. Idealerweise befinden sich DACCs-Anlagen direkt bei geeigneten Kohlenstoffspeicherorten, um die Transportkosten zu minimieren.

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: gering (innerhalb Kantonsgrenzen)

Das Potenzial von DACCs wird hauptsächlich von den vorhandenen Energiekapazitäten beschränkt. Im Vergleich zu anderen CDR-Technologien sind die Energiebedürfnisse und die damit einhergehenden finanziellen Kosten sehr hoch. DACCs bietet sich somit eher als unterstützende Massnahme an, falls das Potenzial günstigere CDR-Technologien nicht ausreicht, um die Ziele zu erreichen.

Falls die CO₂-Abscheidung innerhalb der Kantonsgrenze eingesetzt werden soll, wird das Potenzial begrenzt durch die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom. Unter Annahme, dass ca. 1% des Stromverbrauchs für DACCs genutzt werden könnte, ergibt sich ein theoretisches Potenzial von ca. 20-25 kt CO₂, wobei eine so hohe freie Verfügbarkeit von Energie in Frage zu stellen ist. Weiterhin ergeben sich Einschränkungen durch die sehr hohen Kosten, die Logistikanforderungen sowie Flächennutzungsfragen, weshalb das Potenzial generell deutlich tiefer liegen dürfte. Daher schätzen wir das realistische Potential von DACCs innerhalb der Kantonsgrenzen als nicht wesentlich ein.

Falls die Technologie nicht auf die Kantons-/Staatsgrenzen beschränkt wäre, könnte wieder von einem deutlich höheren Potenzial ausgegangen werden. Voraussetzung wäre auch hier eine grosse verfügbare Menge erneuerbarer Energie und nahegelegene permanente Speichermöglichkeiten.

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

Dies würde jedoch Abklärungen zu Anrechenbarkeit und internationalen Kompensationspraktiken sowie notwendige internationale Abkommen mit sich bringen. Daher wurde hierzu keine Potenzialschätzung gemacht.

Permanenz

>1000 Jahre

Die Permanenz hängt massgeblich davon ab, in welcher Form das abgeschiedene CO₂ gespeichert wird. Für die beiden plausibelsten Möglichkeiten, geologische Tiefenspeicherung und in Abbruchzement, kann jedoch eine Permanenz von >1000 Jahre angenommen werden.

Energiebedarf

50 GWh / Jahr (für rund 20-25kt / CO₂)

Der Energiebedarf liegt je nach Technologie zwischen 1.9 und 2.5 MWh/t CO₂, wobei der grösste Teil Wärmeenergie ist.¹

Logistikanforderungen

Falls die CO₂-Abscheidung innerhalb der Kantongrenzen durchgeführt werden soll, ergeben sich hohe Logistikanforderungen. Durch das dezentrales Abscheidungsnetz mit einer hohen Anzahl kleiner Anlagen kommt zu hohen Transportaufwänden, selbst bei einem bestehenden Pipelinennetzwerk. Ausserdem benötigen die DACCS-Anlagen im Vergleich zur Anwendung von CCS an Punktquellen pro Tonne CO₂ viel Platz. Die Logistikanforderungen sind daher deutlich höher als für CCS-Anwendungen an Punktquellen, welche theoretisch direkt an Pipelines angeschlossen werden können.

Kosten im Jahr 2050

250 CHF / t CO₂

Bei führenden DACCS-Anbietern liegen die Kosten zwischen 600 und 800 CHF pro gespeicherter Tonne CO₂ (inkl. Transport). Konservative Schätzungen setzen den zukünftigen Preis von DACCS bei 250 CHF / t CO₂ an.²

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

Weitere Vor- und Nachteile

- + Ortsunabhängigkeit. DACC ist nicht an einen spezifischen Standort gebunden, und kann somit an der logistisch kostengünstigsten Stelle operieren.
- + Zusätzlichkeit ist vollständig gegeben. DACC hat im Gegensatz zu anderen Methoden, wie Gesteinsverwitterung, Pflanzenkohle oder CCS mit fossil-biogenem Abgasgemisch, eine einfache Systemgrenze und Überprüfbarkeit.
- Sehr hoher Energieaufwand durch die tiefe CO₂-Konzentration in der Luft im Vergleich zu Punktquellen.
- Ebenso höhere Kosten und Logistikanforderungen als für andere CCS/CDR Technologien.

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

¹ [Direct Air Capture - Energy System - IEA](#)

² Beuttler et al. (2019). «The Role of Atmospheric Carbon Dioxide Removal in Swiss Climate Policy – Fundamentals and Recommended Actions». BAFU

Stand heute gehen wir davon aus, dass DACCS, CCS ARA, Pflanzenkohle und Beschleunigte Gesteinsverwitterung eher eine ergänzende oder unterstützende Rolle für das Erreichen von Netto-Null 2050 aufweisen. CCS Zement zusammen mit BECCS und CCS KVA weisen deutlich höhere Potenziale auf, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	Sehr hoch	Gesamtpotenzial ↓
Anbindung an ein CO ₂ -Pipelinenetzwerk ist gewährleistet.	hoch	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↓
Das CO ₂ wird vollständig in geologischen Reservoirn oder Abbruchzement gespeichert.	mittel	Permanenz ↓, Kosten und Energiebedarf unklar
Grundsätzlich wird CCS/CDR (mindestens die Abscheidung) innerhalb der Kantongrenzen angewendet	mittel	Gesamtpotenzial ↑

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

CCS und CDR Perspektiven Aargau

Faktenblatt BECCS

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
45 (gesamt durch Biomasse: 335*)	150-200	1.1	>1000 Jahre möglich	CDR

Abschätzungen für das Jahr 2050. Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen.

*Insgesamt kann durch die verfügbare Biomasse ein theoretisches CDR-Potenzial von rund 335kt CO₂eq er-schlossen werden (für die Summe von BECCS, Pflanzenkohle, sowie biogene Brennstoffe in Zementwerken und KVA.). Aufgrund von Nutzungskonflikten und wenig grossen Punktquellen für Biogas und Holzfeuerungen gehen wir von einem deutlich tieferen Potenzial für BECCS aus (siehe unten).



Grafik: Minx et al. (2017).

Beschreibung

BECCS bezeichnet die Abscheidung und permanente Speicherung von CO₂-Emissionen, die bei der Erzeugung von Bioenergie entstehen. CCS wird direkt am Kraftwerk (der Punktquelle) vorgenommen. Für die Energieerzeugung wird Biomasse, also nachwachsende Rohstoffe verwendet, deren CO₂-Bilanz ohne weitere Einwirkung grundsätzlich neutral ist. Sofern dem System nur so viel Biomasse entnommen wird, wie auch wieder nachwächst, führt eine Abscheidung des CO₂ gleichzeitig zu einem CO₂-Entzug aus der Atmosphäre (CDR).¹

Als Energieträger können diverse biogene Substanzen genutzt werden, wobei dies in der Regel Abfallprodukte (z.B. Lebensmittel oder Grünschnitt) sind. Diese werden dann zu Biogas umgewandelt und in dieser Form als Brennstoff verwendet. Auch Holz kann als Energieträger benutzt, dieses eignet sich jedoch nicht für die Biogaserzeugung, sondern würde in der Regel direkt verbrannt (Holzfeuerungen, v.a. für Fernwärme).

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: 45kt CO₂ / Jahr CDR durch CCS

Gesamtpotenzial CDR aus nachwachsenden Quellen (BECCS, KVA, Zement und Pflanzenkohle): ca. 335kt CO₂ / Jahr. Das Potenzial BECCS kann also höher oder tiefer ausfallen, je nachdem wie viel dieses Gesamtpotenzials auf KVA, Pflanzenkohle und Zement entfällt.

Das zukünftige Potenzial von BECCS hängt von folgenden Faktoren ab:

- Die Verfügbarkeit von (nachhaltigem) biogenem Material.
- Nachfrage nach Energie aus Biogasanlagen und Holzfeuerungen.
- Anteil der vor- und nachgelagerten Emissionen (Produktion und Transport Biomasse, Transport CO₂, etc.).

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

¹ Grundsätzlich gilt auch CCS bei KVA und Zementwerken als BECCS, jedoch nur für den biogenen Anteil, der in den KVA verwertet wird. Der Einfachheit halber wird das Potenzial von CCS bei KVA und Zement jedoch in einem separaten Faktenblatt diskutiert und an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

die bis 2050 klimaneutral sind.

Das quantitative Potenzial ist einerseits begrenzt durch die Zufuhr nachhaltigen biogenen Materials, sowie durch Gesamtkapazität der Biogas-/Holzkraftwerke.

Biogasanlagen: Aktuell stösst die grösste Biogasanlage im Kanton Aargau lediglich gut 11kt CO₂ / Jahr aus, wodurch kaum Potenzial für CCS auf solchen Anlagen besteht. Grundsätzlich wird jedoch das gesamte CO₂ (als Nebenprodukt der Methanherstellung, welches ca. 40% der Gesamtemissionen ausmacht²), das bei der Biogasproduktion selbst entsteht sowieso vom Methan separiert. Daher kann eine Abscheidung relativ einfach durchgeführt werden, unabhängig von der Grösse der Punktquelle³. Somit resultiert trotz der geringen Menge an der Punktquelle ein CDR-Potenzial von ca. 10 kt CO₂ / Jahr.

Holzfeuerungen: Zusätzlich kann durch Holzfeuerung theoretisch ein grosses Potenzial ausgeschöpft werden, wobei hier die Menge durch das verfügbare, nachhaltig bewirtschaftete Holz und Zielkonflikte bei dessen Nutzung (Pflanzenkohle, Zementfeuerungen, Naturschutz, Holzbau, etc.) begrenzt wird. Gemäss O'Connor et al. (2024)⁴ ergäbe sich bis 2050 für eine CO₂ optimierte Waldwirtschaft ein zusätzliches CDR-Potenzial von etwa 65 kt CO₂ / Jahr zusätzlich durch Energieholz. Basierend auf den EP 2050+ nimmt die Holzfeuerung für die Schweiz jedoch eher ab als zu. Hinzu kommt, dass auch hier kaum grössere Punktquellen bestehen, welche für CCS in Frage kommen. Aktuell weisst nur eine Punktquelle im Kanton Emissionen von > 7 kt CO₂ / Jahr auf (mit ca. 40kt / Jahr), überhaupt für CCS in Frage kommen könnte⁵. Entsprechend liegt das Potenzial unter gegebenen Umständen bei maximal rund 35kt CO₂ / Jahr.

Somit gehen wir von einem realistischen Gesamtpotenzial von ca. 45 kt CO₂ / Jahr für BECCS durch Biogasanlagen und Holzfeuerungen aus.

Permanenz

>1000 Jahre

Die Permanenz hängt massgeblich davon ab, in welcher Form das abgeschiedene CO₂ gespeichert wird. Für die beiden plausibelsten Möglichkeiten, geologische Tiefenspeicherung und in Abbruchzement, kann jedoch eine Permanenz von >1000 Jahre angenommen werden.

Energiebedarf

20 GWh / Jahr

Der Energiebedarf für die CO₂-Abscheidung kann direkt über die Bioenergieanlagen gedeckt werden, ist jedoch mit über 1 MWh / t CO₂ sehr hoch. Dies bedeutet, dass sich der Energiebedarf einer Bioenergieanlage mit Aminwäsche insgesamt um bis zu 20% erhöhen könnte⁶, was für die in Frage kommende Punktquelle mit knapp 110 GWh Leistung über 20 GWh / Jahr entsprechen würde. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt mit den heutigen Energienutzungen.

Logistikanforderungen

Für die skalierte Anwendung von CCS ist ein nationales und internationales Pipelinennetzwerk vonnöten, um die riesigen Mengen an abgeschiedenem CO₂ (zu den Lagerstätten) zu transportieren. Auf Kantonsebene ist daher ein Anschluss an dieses Netzwerk essenziell. Für die Schätzungen zu Potenzialen und Kosten, wird ein solches Pipelinennetzwerk angenommen.

² www.azenergie.ch (abgerufen 2024)

³ Dies wird auch bereits teilweise durchgeführt, siehe: <https://www.regionalwerke.ch/co2-verfluessigung>

⁴ O'Connor et al. (2024): CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes, EBP.

⁵ Diese ist tatsächlich aktuell in Abklärungen für eine Abscheidungsanlage.

⁶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2007: Strukturell-ökonomisch ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage. Wuppertal.

Kosten im Jahr 2050**150-200 CHF / t CO₂**

Die Kosten sind vielen Faktoren abhängig und werden von aktuellen Studien^{7,8} auf rund 150-200 CHF / t CO₂ inkl. Transport und Lagerung eingeschätzt. Die meisten Studien beziehen sich hierbei jedoch auf grössere Punktquellen (>100kt CO₂ / Jahr), weshalb für den hier vorliegenden Fall zumindest für die Holzfeuerungen von höheren Kosten auszugehen ist.

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

Weitere Vor- und Nachteile, Herausforderungen

- +/- Grundsätzlich ist die Anwendung im Vergleich zu anderen NET relativ einfach, insbesondere, wenn es sich um wenige Punktquellen handelt. Aktuell ist dies jedoch nicht der Fall, da keine grossen Punktquellen bestehen. Dies erhöht die Kosten und schmälert damit das (realistische) Potenzial.
- +/- Je nach Ausgangsmaterial kann BECCS eine relevante positive oder negative Auswirkung auf Landnutzung und damit auf CO₂ Speicher in den Ökosystemen, aber auch auf die Biodiversität haben. Aus Lebenszyklus-sicht ist es daher essenziell, dass das biogene Material aus nachhaltigen Quellen stammt.
- Es bestehen diverse Nutzungskonflikte mit anderen Formen der Biomasseverwertung (Nahrungsmittel, Holzbau, Zement- und KVA-Feuerungen, Pflanzenkohle, Biotreibstoff, etc.), die zu Knappheit führen könnten und damit einerseits zu höheren Preisen und andererseits zu Abstrichen bei der nachhaltigen Landnutzung (was die CO₂ Bilanz wiederum verschlechtern würde).
- Braucht sehr grosse initiale Investitionen für die Anschaffung.
- Eine entsprechende Transportinfrastruktur (Pipelines) wird benötigt, um Kostensparnisse zu erreichen.
- Geringe technologische Reife der vollständigen Umsetzung (d.h. grosse Mengen, inkl. Endlagerung des CO₂).

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass BECCS zusammen mit CCS Zement und CCS KVA eine wichtige Rolle spielen wird, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine eher ergänzende oder unterstützende Rolle sehen wir bei CCS ARA, Pflanzenkohle, Beschleunigter Verwitterung und DACCS. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirt-schaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

⁷ Eckle et al. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44583>

⁸ 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.

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	Sehr hoch	Gesamtpotenzial ↓
Anbindung an ein CO ₂ -Pipelinenetzwerk ist gewährleistet.	hoch	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↓
Für die Abscheidung wird Aminwäsche eingesetzt (anstelle von HPC oder Oxyfuel).	hoch	Energiebedarf ↘, Kosten ↘
Das Potenzial durch verfügbare Biomasse beträgt total ca. 335kt CO ₂ eq (+65kt gegenüber 2021).	hoch	Gesamtpotenzial unklar
Das CO ₂ wird vollständig in geologischen Reservoirn oder Abbruchzement gespeichert.	mittel	Permanenz ↓, Kosten und Energiebedarf unklar
Punktquellen für CCS sind nur in Ausnahmefällen kleiner als 50kt CO ₂ / Jahr.	mittel	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↑
Die Abscheidungsrate vom Abgas beträgt mindestens 90%.	tiefe	Gesamtpotenzial ↘

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

CCS und CDR Perspektiven Aargau

Faktenblatt Pflanzenkohle

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
15 (gesamt durch Biomasse: 335*)	15-30	energiepositiv	<100 bis >1000 Jahre	CDR



Grafik: adaptiert von Minx et al. (2017).

Abschätzungen für das Jahr 2050. Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen.

*Insgesamt kann durch die verfügbare Biomasse ein theoretisches CDR-Potenzial von rund 335kt CO₂eq erreicht werden (für die Summe von BECCS, Pflanzenkohle, sowie biogene Brennstoffe in Zementwerken und KVA.). Aufgrund von Nutzungskonflikten gehen wir von einer deutlich tieferen Anwendung von Pflanzenkohle aus (siehe unten).

Beschreibung

Pflanzenkohle (engl. Biochar) bezeichnet das Produkt aus der künstlichen Verkohlung von Biomasse (zumeist Holz). Am häufigsten wird dabei das trockene Material unter Ausschluss von Sauerstoff und bei hohen Temperaturen verkohlt (Pyrolyse), es finden sich jedoch auch Ansätze mit hohem Wasseranteil (Hydrochar). Im Prozess entstehen einerseits nutzbare Energie und andererseits die Pflanzenkohle, die chemisch sehr unreakтив ist. Diese Kohle kann entweder im Boden ausgebracht werden, wo sie zur Bindung von Nährstoffen, Wasser oder auch Treibhausgasen wie Lachgas oder Methan beitragen kann. Sie kann jedoch auch (z.B. für die energetische Nutzung im Falle von Engpässen) gelagert werden, verschiedenen Materialien wie Zement oder Asphalt beigegeben oder als Futtermittelzusatz verwendet werden. Wenn die verwendete Biomasse aus nachhaltig gewonnenen nachwachsenden Rohstoffen besteht, führt Pflanzenkohle in all diesen Fällen zumindest für einen gewissen Zeitraum zu einer netto CO₂-Entnahme der Atmosphäre oder zu einer Verminderung anderer Treibhausgase wie Lachgas und Methan.

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: 15 (bis theoretisch max. 335 für Biomassenutzung total) kt CO₂ / Jahr CDR

Insgesamt beläuft sich das Potenzial von Biomasse im Kanton Aargau im Jahr 2050 auf maximal 335kt CO₂eq. Betrachtet man nur das verfügbare Energieholz, so ergäbe sich bei rund 116kt Energieholz¹ ein maximales Potenzial von rund 200kt CO₂ durch Pflanzenkohle.

Theoretisch könnte das gesamte Biomasse-Potenzial nur für

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

¹ O'Connor et al. (2024): CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes, EBP. Gemäss CO₂-optimiertem Szenario.

Pflanzenkohleproduktion verwendet werden. In der Realität ist dies jedoch unwahrscheinlich, weil die verfügbare Biomasse heute und auch in Zukunft in verschiedenen Anwendungen wie Bauholz, Energiegewinnung (inkl. Zementwerke und KVAs) und Biogasproduktion benötigt wird.

Das tatsächliche Marktpotenzial von Pflanzenkohle hängt also primär vom Mix an Verwertungsmöglichkeiten ab, welcher durch den Markt und die Politik gesteuert wird. Unter den Annahmen, dass die Verwertung von Biomasse durch KVA und Holzfeuerungen konstant bleibt und die Nutzung durch die Zementwerke aufgrund der Roadmap von Cemsuisse² stark zunimmt, resultiert nur ein kleines tatsächliches Marktpotenzial für Pflanzenkohle. Konkret hält eine unveröffentlichte, interne Studie des Kantons Aargau ein Pflanzenkohlewerk mit einer Kapazität von bis zu 6kt Kohle / Jahr für sinnvoll (was je nach Anwendung rund 12-20kt CO₂ entsprechen würde). Aus diesen Gründen schätzen wir das realistische Marktpotenzial durch Pflanzenkohle konservativ auf rund **15kt CO₂** ein.

Permanenz

<100 bis >1'000 Jahre

Die Permanenz hängt primär von der Nutzungsart der Pflanzenkohle ab.

- Ausbringung in landwirtschaftlichen Böden: Je nach Material, Boden, Bewirtschaftung <100 bis >1'000 Jahre.
- In Baumaterialien o.ä.: Je nach Lebensdauer und Verwertung des Materials <100 bis >1'000 Jahre.
- Lagerung/Speicherung: Grundsätzlich >1'000 Jahre.

Anwendungen <100 Jahre sind aufgrund der geringen Permanenz nicht als CDR anzusehen.

Energiebedarf

Zusätzliche Energie von rund 2 MW / t CO₂.

Die Herstellung von Pflanzenkohle ist (ohne Berücksichtigung von Substitutionseffekten) energiepositiv mit ca. 2 MWh nutzbare Wärme pro t CO₂ in Pflanzenkohle.³

Logistikanforderungen

Aus logistischer Sicht ist die Nutzung von Pflanzenkohle im Vergleich zu CCS oder beschleunigter Verwitterung weniger komplex. Die Transportlogistik für den Einsatz in der Landwirtschaft ist beispielsweise vergleichbar mit bereits vorhandenen Warenströmen im Düngebereich. Entsprechend dürfte dies keine weitere signifikante Transportinfrastruktur verlangen.

Kosten im Jahr 2050

10-30 CHF / t CO₂

Produktionskosten in der Schweiz: 300-700 CHF / t Pflanzenkohle, was ca. 120-200 CHF / t CO₂ entspricht.⁴ Für das Jahr 2050 gehen Studien jedoch von deutlich tieferen Werten von rund 10-30 CHF aus.⁵

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

² Cemsuisse: Roadmap 2050, S. 6, https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf

³ IWB (2024): <https://sevogel.ch/wp-content/uploads/2020/02/IWB-Pyrolyse-Infografik-1019-980x473.jpg>

⁴ Prognos und INFRAS, (2021): Energieperspektiven 2050+, Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz.

⁵ 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.

Weitere Vor- und Nachteile, Herausforderungen

- + Vielseitige und flexible Einsatzgebiete in Landwirtschaft, Bau, für Filter oder als Energiespeicher.
- + Im Gegensatz zu anderen CCS/CDR-Technologien wird Pflanzenkohle in der Schweiz bereits hergestellt und angewandt und entsprechende Infrastruktur ist gegeben.
- + Tiefste prognostizierte Kosten aller betrachteten Technologien pro t CO₂eq.
- + Kann in der Landwirtschaft Emissionen von Lachgas und Methan reduzieren.
- + Zwar wäre ein Import von Biomasse bzw. Holz (oder sogar Pflanzenkohle) aus dem Ausland denkbar, um das quantitative Potenzial zu erhöhen, dabei müsste jedoch sichergestellt werden, dass das Material aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern kommt, was in der Realität sehr schwierig ist. Dazu kommen notwendige Abkommen zur Anrechenbarkeit der Negativemissionen, sowie die weiterhin bestehenden Nutzungs-konflikte auf internationaler Ebene.
- + Die Permanenz von Pflanzenkohle ist stark abhängig von der Anwendung und dadurch stand heute sehr unsicher. Bei der Lagerung ist eine Permanenz von grösser 1'000 Jahren grundsätzlich gegeben. Bei ande- ren Anwendungen ist die Permanenz und/oder das CDR-Potenzial in jedem Fall geringer.
- Die Ausbringung auf Ackerflächen, beinhaltet gewisse Risiken (z.B. durch Schadstoffe).

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der einzelnen CCS- und CDR-Anwendungen für den Kanton Aargau im Kontext des Netto-Null Ziels beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffent-lichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass Pflanzenkohle, CCS ARA, Beschleunigte Gesteinsverwitterung und DACCS eher eine ergänzende oder unterstützende Rolle für das Erreichen von Netto-Null 2050 aufweisen. CCS Zement zusammen mit BECCS und CCS KVA weisen deutlich höhere Potenziale auf, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zu- sammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette bzw. Forstwirtschaft ist vollständig CO ₂ -neutral.	hoch	Gesamtpotenzial ↓
Das Potenzial durch verfügbare Biomasse be-trägt total ca. 335kt CO ₂ eq (+65kt gegenüber 2021).	hoch	Gesamtpotenzial unklar
Energieholz-Verbräuche von bestehenden An-wendungen haben für die Nutzung im Jahr 2050 Vorrang.	hoch	Gesamtpotenzial ↑

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau
CCS und CDR Perspektiven Aargau
Faktenblatt Beschleunigte Gesteinsverwitterung

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
<50	75-170	0.05-0.43	>1000 Jahre möglich	CDR

Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen.



Grafik: Minx et al. (2017).

Beschreibung

Gewisse Kalzium-, Magnesium- oder Eisen-reiche Silikate binden bei der Verwitterung CO₂. Normalerweise finden diese Prozesse über geologische Zeiträume statt und sind viel zu langsam, um den menschgemachten CO₂ Ausstoss wesentlich zu verlangsamen. Daher wird das Gestein in diesem Fall sehr fein gemahlen, um die Oberfläche zu vergrössern und damit die Verwitterungsraten stark zu erhöhen. Anschliessend wird der Gesteinsstaub grossflächig auf landwirtschaftlichen Flächen und ggf. weiteren Grünflächen verteilt. Durch diesen Prozess wird der Atmosphäre theoretisch CO₂ entzogen, aktuell bestehen jedoch noch sehr hohe Unsicherheiten bezüglich Verwitterungsraten und praktischer Anwendung.

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: <50kt CO₂ / Jahr CDR

Das Potenzial für beschleunigte Verwitterung ergibt sich hauptsächlich aus:

- Der Verfügbarkeit geeigneter Mineralien
- Der verfügbaren Fläche zur Ausbringung
- Der Transportlogistik

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

Global betrachtet ist die Verfügbarkeit geeigneter Mineralien (insbesondere von Olivin) als unbeschränkt zu betrachten. In der Schweiz selbst und insbesondere im Kanton Aargau erscheint die Verfügbarkeit jedoch stark limitiert bzw. nicht abschliessend geklärt.¹ Es muss also davon ausgegangen werden, dass Gesteinsmaterial importiert werden müsste.

Die Menge an durch die Verwitterung theoretisch entziehbares CO₂ pro Fläche und Jahr liegt gemäss Schätzungen bei etwa 4.1-8.0 t CO₂ / ha / Jahr für landwirtschaftliche Flächen in Deutschland, Frankreich und Italien², je nach Bodentyp und Klima. Für die Schweiz kann ein Mittelwert von rund 6 t CO₂ / ha / Jahr angenommen

¹ Brunner & Knutti (2022): Potentials and costs of CO₂ removal in Switzerland.

² Beerling et al., (2020): Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature.

werden. Damit läge das Potenzial bei der Ausbringung auf landwirtschaftlichen Böden bei rund 340kt CO₂ / Jahr im Kanton Aargau.

Limitiert scheint das Potenzial dieser Technologie jedoch eher durch die Verfügbarkeit des Gesteins und der Transportlogistik. Eine Studie schätzt für den Kanton Zürich eine logistisch zu bewältigende Menge an Gestein von 125kt / Jahr und eine Verwitterung von rund 1/3 pro Tonne Gestein, was bei ähnlichen Größenordnungen im Kanton Aargau eins Gesamtpotenzial von maximal 50kt CO₂ / Jahr ergibt³.

Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten bezüglich Verwitterungsraten, Produktions- und Transportmöglichkeiten für die Schweiz, sowie Akzeptanz der landwirtschaftlichen Betriebe erscheint diese konservative Annahme als realistischer.

Permanenz

> 1'000 Jahre

Grundsätzlich wird bei der beschleunigten Gesteinsverwitterung CO₂ in geologischen Zeiträumen gebunden und gespeichert.

Energiebedarf

2.5-21 GWh / Jahr

Der Energiebedarf zum Mahlen von Gestein liegt bei ca. 20 und 170 kWh / t Gestein für Korngrößen <100µm respektive <10µm.⁴ Dies entspräche einem Energiebedarf von 2.5-21 GWh je nach Korngröße für die konservative Schätzung von 50kt CO₂ / ha / Jahr, und damit geringeren Werten, als bei CCS Anwendungen.

Logistikanforderungen

Die Anforderungen an Transportdienstleistungen sind sehr hoch, da einerseits sehr grosse Mengen an Material transportiert und andererseits weit verteilt werden muss. Es ist jedoch festzuhalten, dass heute im Kanton Aargau bereits Zement- und Kiesmengen abgebaut und transportiert werden, die mehr als 20-mal über der konservativen Schätzung für den Gesteinsstaub liegen. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass eine Transportlogistik nicht limitierend wäre, hing jedoch stark davon ab, wo das Gestein abgebaut und gemahlen würde (innerhalb Kantons- bzw. Schweizer Grenzen oder nicht). Da aktuell in der Schweiz noch keine Untersuchungen dazu gemacht wurden, ist die Unsicherheit bezüglich Abbau und entsprechendem Transport hoch.

Kosten im Jahr 2050

75- 170 CHF / t CO₂

Je nach Korngröße, zu der das Gestein gemahlen wird, ergeben sich Kosten von rund 75- 170 CHF / t CO₂⁵, wobei die Korngröße auch die Verwitterungsschwindigkeit und damit das Gesamtpotenzial massgeblich beeinflusst.

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

Weitere Vor- und Nachteile, Herausforderungen

- + Kein Konflikt um biogene Ressourcen.
- + Im Vergleich zu den anderen Technologien, insbesondere CCS, tiefer Energieaufwand pro t CO₂.
- Hohe Unsicherheit zu den Verwitterungsraten.

³ 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.

⁴ Rinder & Hagke (2021): The influence of particle size on the potential of enhanced basalt weathering for carbon dioxide removal - Insights from a regional assessment.

⁵ Beerling et al. (2020): Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature.

-
- Hohe Unsicherheiten zur Herkunft des Materials und damit bezüglich Transport und Logistik.
 - Unsichere gesundheitliche und ökologische Folgen, daher unsichere Akzeptanz in der Bevölkerung.
 - Schwierige bis unmögliche Verifizierung der CDR-Beiträge für kantonale/nationale Inventare.

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass Beschleunigte Gesteinsverwitterung, CCS ARA, Pflanzenkohle und DACCS eher eine ergänzende oder unterstützende Rolle für das Erreichen von Netto-Null 2050 aufweisen. CCS Zement zusammen mit BECCS und CCS KVA weisen deutlich höhere Potenziale auf, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	Sehr hoch	Gesamtpotenzial 
Die Transportlogistik (aus dem Ausland) ist limitierend.	hoch	Gesamtpotenzial 
Die Anwendung beschränkt sich auf landwirtschaftliche Flächen.	mittel	Gesamtpotenzial  , Kosten 

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau
CCS und CDR Perspektiven Aargau
Faktenblatt CCS ARA

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
15	160-190	0.8	> 1000 Jahre mög- lich	CDR

Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten haftlichen Erkenntnissen.

*Insgesamt kann durch die verfügbare Biomasse ein theoretisches CDR-Potenzial von rund 335kt CO₂eq er-schlossen werden (für die Summe von BECCS, Pflanzenkohle, sowie biogene Brennstoffe in Zementwerken und KVA.). Der Anteil ARA wird dabei als relativ starr angenommen.



Grafik: adaptiert von Minx et al. (2017).

Beschreibung

In den 41 Aargauer Abwasserreinigungsanlagen (ARA) fallen jährlich 15'000 Tonnen Klärschlamm (Trockensubstanz) an, wovon der überwiegende Anteil (rund 80%) biogen ist¹ (ursprünglich über Pflanzen gebundener Kohlenstoff, der durch Menschen und ggf. Tiere verwertet wurde). Dieser Klärschlamm kann entweder unter Abscheidung des CO₂ (CCS/CDR) verbrannt werden oder thermisch zu einer chemisch inerten Form umgewandelt werden (analog Pflanzenkohle).

Die Hauptemissionsquellen der ARA sind jedoch Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄). Diese müssten zusätzlich abgeschieden respektive beseitigt werden, wofür jedoch Stand heute noch keine technologische Lösung ersichtlich ist.

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: 15 kt CO₂ CDR durch CCS

Das zukünftige Potenzial von CCS bei Abwasserreinigungsanlagen hängt von folgenden Faktoren ab:

- Menge an Klärschlamm.
- Möglichkeit der Methan- und Lachgasabscheidung, resp. Neutralisierung.
- Möglichkeit der Sammlung von Klärschlamm an zentralen Punktquellen (z.B. KVA oder Zementwerke).

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

Grundsätzlich hängt die Entwicklung der Menge an Klärschlamm vor allem mit der Bevölkerungsentwicklung zusammen. Gegenwärtig sind keine grundlegenden Trends für die Menge an Klärschlamm zu beobachten.

¹ Umweltbundesamt 2022, online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_149-2022_bestimmung_der.biogenen.kohlenstoffgehalte_von_klaerschlamm_und_faulgas_und.untersuchung_von_abhaengigkeiten_zu_klaeranlagen-basisdaten_abwasserwerten_und_klaerschlammzusammensetzung.pdf

Da bei der Behandlung von Klärschlamm mehrere Treibhausgase entstehen, ist das Reduktions-/CDR-Potenzial aufgeschlüsselt zu betrachten. Methan entsteht bei der Faulung des Klärschlammes und kann direkt vor Ort thermisch verwertet werden, wobei CO₂ entsteht. Bei der Verbrennung des Klärschlammes entsteht Lachgas, dieses zerfällt bei genug hohen Temperaturen im Ofen zu Stickstoff und Sauerstoff. Das bei der Verbrennung des Klärschlammes und des Methans entstehende (v.a. biogene) CO₂ kann abgeschieden werden.

Da die Methanverbrennung oft vor Ort geschieht und somit nicht immer mit weiteren Abgasen verbunden werden kann, ist die Emissionsmenge deutlich zu klein, um für CCS berücksichtigt zu werden. Es ist jedoch denkbar, dass hier in Zukunft durch technologische Entwicklungen noch Potenziale entstehen.

Das Potenzial liegt somit unter Berücksichtigung nur der CO₂-Emissionen der Klärschlammverbrennung bei 15 kt CO₂ / Jahr.² Dieser Wert bedingt, dass der gesamte Klärschlamm in Anlagen mit CO₂-Abscheidungen verbrannt wird, da die ARA selbst deutlich zu klein sind. Dies müsste entsprechend in KVA oder Zementwerken geschehen (siehe entsprechende Faktenblätter).

Permanenz

>1000 Jahre

Die Permanenz hängt massgeblich davon ab, in welcher Form das abgeschiedene CO₂ gespeichert wird. Für die beiden plausibelsten Möglichkeiten, geologische Tiefenspeicherung und in Abbruchzement, kann jedoch eine Permanenz von >1000 Jahre angenommen werden.

Energiebedarf

Bei der Verbrennung in Zementwerken entsteht kein zusätzlicher Energiebedarf, da dieser bereits dort ausgewiesen wird (ist unabhängig vom Brennstoff). Grundsätzlich liegt der Energiebedarf von Oxyfuel, was für Zementwerke als Abscheidungstechnologie angenommen wird, bei rund **0.8 MWh / t CO₂**.

Im Falle von Aminwäsche in KVAs kann der Energiebedarf Grossteils durch die Abwärme der Anlage gedeckt werden, ist jedoch wesentlich (ca. 1 MWh / t CO₂, was ca. 13 GWh / Jahr entspricht³ - siehe Faktenblatt KVA). Falls der Klärschlamm an einer KVA verbrannt wird, ist dieser Energiebedarf auch als zusätzlich anzunehmen, da sich dadurch die Menge an Brennstoff und die CO₂-Emisionen insgesamt erhöhen würden.

Da die Verbrennung in Zementwerken angenommen wird und um Doppelzählungen zu vermeiden, wird das hier ausgewiesene CDR-Potenzial des Klärschlamm beim Zement entsprechend abgezogen. Außerdem weisst CCS ARA dadurch keinen eigenen Energiebedarf auf.

Logistikanforderungen

Aufgrund der Punktquellengrösse ist es sinnvoll, dass der getrocknete Klärschlamm für die Verbrennung zu einer KVA oder einem Zementwerk transportiert wird. Dies stellt keine grossen Logistikanforderungen (und teilweise bestehen solche Prozesse bereits).

Die Erfüllung der Logistikanforderungen für CCS an KVA oder Zementwerken (siehe entsprechende Faktenblätter) sind jedoch Voraussetzung für die Ausschöpfung des Potenzials.

Kosten im Jahr 2050

160-190 CHF / t CO₂

² Aufgrund der kleinen Menge wird der geringe fossile (Reduktions-)Anteil hier nicht separat ausgewiesen.

³ KVA Linth, Factsheet CCS: online: https://www.kva-linth.ch/fileadmin/user_upload/Factsheet_CCS.pdf (abgerufen Januar 2025).

Unsicherheit hoch: siehe Box «Annahmen».

Die Kosten sind vielen Faktoren abhängig und werden von aktuellen Studien^{4,5} auf rund 160-190 CHF / t CO₂ inkl. Transport und Lagerung geschätzt (siehe CCS Zement). Solange die Verbrennung an sehr kleinen Punktquellen stattfindet, sind die Kosten jedoch substanzial höher. Ein vergleichbares Projekt in Zürich⁶ plant aktuell mit Kosten von über 700 CHF / t CO₂ bis 2050.

Abschätzung unsicher:
Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

Weitere Vor- und Nachteile

- + Verbrennung von Klärschlamm in KVA oder Zementwerken möglich (wird z.T. schon gemacht). Es fällt ein zusätzlicher Transportaufwand an, dafür wird erheblich Kosten gespart.
- Für die zahlreichen kleineren Emissionsquellen des Reinigungsprozesses (neben der Verbrennung des Klärschlammes) ist keine CO₂- Abscheidung möglich. Ebenso bestehen aktuell keine praktischen Anwendungsmöglichkeiten, um N₂O oder das CO₂ aus der Methanverbrennung abzuscheiden.

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass CCS ARA, Pflanzenkohle, Beschleunigte Gesteinsverwitterung und DACCS eher eine ergänzende oder unterstützende Rolle für das Erreichen von Netto-Null 2050 aufweisen. CCS Zement zusammen mit BECCS und CCS KVA weisen deutlich höhere Potenziale auf, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Verbrennung findet in Zementwerken oder KVA statt, nicht an der ARA selbst.	mittel	Kosten ↑, Energiebedarf ↑
Anbindung an ein CO ₂ -Pipelinetzwerk ist gewährleistet.	hoch	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↓
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	mittel	Gesamtpotenzial ↘
Das CO ₂ wird vollständig in geologischen Reservoirn oder Abbruchzement gespeichert.	mittel	Permanenz ↓, Kosten und Energiebedarf unklar
Die Abscheidungsrate vom Abgas beträgt mindestens 90%.	tief	Gesamtpotenzial ↘

⁴ Eckle et al. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44583>

⁵ 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 BAU.

⁶ ARA Werdhölzli, siehe: https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/actions/EN_M1

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

CCS und CDR Perspektiven Aargau

Faktenblatt CCS KVA

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

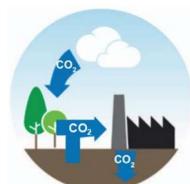
Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduk- tion?
300, davon 150* CDR	150-200	1.1	> 1000 Jahre möglich	Gemischt

Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten haftlichen Erkenntnissen.

*Insgesamt kann durch die verfügbare Biomasse ein theoretisches CDR-Potenzial von rund 335kt CO₂eq errechnet werden (für die Summe von BECCS, Pflanzenkohle, sowie biogene Brennstoffe in Zementwerken und KVA.). Der Anteil KVA wird dabei als relativ starr angenommen.



Grafik: adaptiert von Minx et al. (2017).

Beschreibung

In der Schweiz zählen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) zu den grössten Punktquellenmittenten. Im Kanton Aargau sind drei Abfallverwertungsanlagen (KVA) in Betrieb: die KVA Buchs, die KVA Oftringen und die KVA Turgi. Diese Anlagen verwerten Haushalts- und Gewerbeabfälle thermisch. In der Regel besteht der Abfall rund zu 50 % aus fossilem und zu 50 % aus biogenem Material. Letzteres setzt sich aus Küchen- und Gartenabfällen zusammen. Die jährlich entstehenden 720 kt CO₂ sind daher ebenfalls jeweils ca. zur Hälfte fossil und biogen. Die Abscheidung und spätere Speicherung von CO₂ (CCS) kann dem Verbrennungsprozess nachgelagert werden, um die hohe CO₂-Konzentration im Abgas zu nutzen. Die Anwendung von CCS führt daher zu einem Reduktionspotenzial für die fossilen Quellen und einem CDR-Potenzial für die biogenen Quellen.

Da die Entsorgung der Abfälle gesetzlich vorgeschrieben ist und die anfallenden Abfälle thermisch behandelt werden müssen, sind die Emissionen pro Tonne fossilem Abfall technisch kaum weiter reduzierbar («schwer vermeidbar»). Das Abfallgemisch ist zudem selbstbrennend und braucht keine weiteren Brennstoffe, um die benötigten Temperaturen zu erreichen. Die Entwicklung der Restemissionen und den entsprechenden CCS-Potenzialen ist somit fast vollständig von der Abfallentwicklung abhängig.

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: Ca. 150 kt CO₂ / Jahr Reduktion durch CCS und 150 kt CO₂ / Jahr CDR durch CCS

Das zukünftige Potential für CCS und CDR in den KVA hängt von zwei Hauptfaktoren ab:

- 1) Die Abfallmenge, welche von Haushalten und Gewerbe produziert wird
- 2) Die Abfallzusammensetzung, wobei die fossilen und biogenen Anteile gemeint sind

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

Gegenwärtig sind keine grundlegenden Trends für diese beiden Faktoren zu beobachten. Das Bevölkerungswachstum kompensiert die Abnahme der Abfallmenge pro Kopf und die Zusammensetzung des Abfalls bleibt mit bereits gut etablierten Grünabfallentsorgungsstellen mehrheitlich unverändert. Das Kunststoffrecycling, welches mit der thermischen Verwertung von Plastik konkurriert, hat ebenfalls noch keinen merklichen Einfluss auf die Zusammensetzung. Für das Jahr 2050 wird deshalb eine ähnliche Abfallmenge und -Zusammensetzung wie heute angenommen.

Unter diesen Annahmen beläuft sich das aargauische Gesamtpotenzial durch CCS an KVAs auf etwa 300kt CO₂ / Jahr wovon die Hälfte, also 150 kt CO₂ als CDR anfallen würde.

Permanenz

>1000 Jahre

Die Permanenz hängt massgeblich davon ab, in welcher Form das abgeschiedene CO₂ gespeichert wird. Für die beiden plausibelsten Möglichkeiten, geologische Tiefenspeicherung und in Abbruchzement, kann jedoch eine Permanenz von >1000 Jahre angenommen werden.

Energiebedarf

300 GWh Wärme plus 20 GWh Strom / Jahr

Der Energiebedarf für die CO₂-Abscheidung in KVAs mit Aminwäsche ist wesentlich (ca. 1 MWh Wärme pro t CO₂ plus ca. 0.1 MWh Strom¹). Dies entspricht hochgerechnet auf das Gesamtpotenzial durch CCS gut 330 GWh / Jahr. Ein grosser Teil davon kann durch überschüssige Prozesswärme gedeckt werden, ein Teil geht jedoch auf Kosten der eigentlichen Energieproduktion für Fernwärme und Strom. Allerdings haben KVA-Betreiber langfristige Verträge mit Energiewerken, welche die erzeugte Wärme und Elektrizität bereits beanspruchen. Die für die CO₂-Abscheidung erforderliche zusätzliche Wärmeenergie müsste somit separat erzeugt werden, damit diese bestehenden Verträge erfüllt werden.

Logistikanforderungen

Für die skalierte Anwendung von CCS ist ein nationales und internationales Pipelinennetzwerk vonnöten, um die riesigen Mengen an abgeschiedenem CO₂ (zu den Lagerstätten) zu transportieren. Auf Kantonsebene ist daher ein Anschluss an dieses Netzwerk essenziell. Für die Schätzungen zu Potenzialen und Kosten, wird ein solches Pipelinennetzwerk angenommen.

Kosten im Jahr 2050

150-200 CHF / t CO₂

Die Kosten sind vielen Faktoren abhängig und werden von aktuellen Studien^{2,3} auf rund 150-200 CHF / t CO₂ inkl. Transport und Lagerung eingeschätzt. Die meisten Studien beziehen sich hierbei jedoch auf grössere Punktquellen (>100kt CO₂ / Jahr), weshalb für den hier vorliegenden Fall von höheren Kosten auszugehen ist.

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

¹ KVA Linth, Factsheet CCS: online: https://www.kva-linth.ch/fileadmin/user_upload/Factsheet_CCS.pdf (abgerufen Januar 2025).

² Eckle et al. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44583>

³ 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.

Weitere Vor- und Nachteile

- + Grundsätzlich ist die Anwendung relativ naheliegend, da KVA emissionsreiche Punktquellen mit hohem biogenen Anteil sind.
- + Im Vergleich zu anderen CCS-Anwendungen ist die Möglichkeit, die Finanzierung verursachergerecht (d.h. über die Abfallverursacher selbst) zu lösen, einfacher.
- + Die öffentliche Hand (der Kanton) hat mehr Möglichkeiten Einfluss zu nehmen im Gegensatz zu rein privatwirtschaftlichen Anwendungen von CCS.
- Geringe technologische Reife der vollständigen Umsetzung (d.h. grosse Mengen, inkl. Endlagerung des CO₂).
- Braucht sehr grosse initiale Investitionen für die Anschaffung.
- Eine entsprechende Transportinfrastruktur (Pipelines) wird benötigt, um Kostensparnisse zu erreichen.

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass CCS KVA zusammen mit BECCS und CCS Zement eine wichtige Rolle spielen wird, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine eher ergänzende oder unterstützende Rolle sehen wir bei CCS ARA, Pflanzenkohle, Beschleunigter Verwitterung und DACCS. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	Sehr hoch	Gesamtpotenzial ↓
Anbindung an ein CO ₂ -Pipelinenetzwerk ist gewährleistet.	hoch	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↓
Für die Abscheidung wird Aminwäsche eingesetzt (anstelle von HPC oder Oxyfuel).	hoch	Energiebedarf ↘, Kosten ↘
Abfallmenge und Zusammensetzung bleibt ähnlich wie bisher.	mittel	Gesamtpotenzial unklar
Das CO ₂ wird vollständig in geologischen Reservoirn oder Abbruchzement gespeichert.	mittel	Permanenz ↓, Kosten und Energiebedarf unklar
Punktquellen für CCS sind nur in Ausnahmefällen kleiner als 50kt CO ₂ / Jahr.	mittel	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↑
Die Abscheidungsrate vom Abgas beträgt mindestens 90%.	tief	Gesamtpotenzial ↗

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau

CCS und CDR Perspektiven Aargau

Faktenblatt CCS Zement

Zürich, 27. Juni 2025

Autoren INFRAS: Felix Weber, Moritz Reisser, David Giger, Jürg Füssler

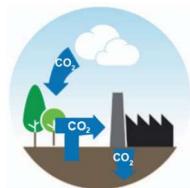
Projektleitung BVU: Lisa Häggerli, Lars Kistler

Übersicht

Potenzial [kt CO ₂ / a]	Kosten [CHF / t CO ₂]	Energiebedarf [MWh / t CO ₂]	Permanenz	CDR oder Reduktion?
460 davon 110* CDR	160-190	0.8	>1000 Jahre möglich	Gemischt

Alle Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Die wichtigsten Annahmen sind am Ende des Faktenblatts dokumentiert. Alle Werte, Annahmen und Einschätzung stammen von INFRAS, ausgehend von den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen.

*Insgesamt kann durch die verfügbare Biomasse ein theoretisches CDR-Potenzial von rund 335kt CO₂eq er-schlossen werden (für die Summe von BECCS, Pflanzenkohle, sowie biogene Brennstoffe in Zementwerken und KVA.). Aufgrund von Nutzungskonflikten und der überhaupt notwendigen Menge an Brennstoff für die Zementwerke gehen wir von einer deutlich tiefen Anwendung von Biomasse in Zementwerken aus (siehe unten).



Grafik: adaptiert von Minx et al. (2017).

Beschreibung

Analog zu anderen Anwendungen von CCS wird die Abscheidung von CO₂ aus den Abgasen direkt am Zementwerk (der Punktquelle) vorgenommen. Die besondere Relevanz von CCS bei Zement ergibt sich aus zwei Faktoren: Einerseits machen die Zementwerke aktuell mehr als 80% der gesamten Industrieemissionen des Aargaus aus. Andererseits ist ein Grossteil (ca. 50-70%) der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung geogenen Ursprungs und entsteht bei der chemischen Umsetzung von Kalk zu Calciumoxid beim Sintern des Zementklinkers^{1,2}. Damit gelten diese Emissionen als schwer vermeidbar. Die restlichen Emissionen bei der Zementherstellung entstehen durch die notwendige Energieerzeugung, sowie vor- und nachgelagerte Prozesse (Transport, Rohstoffabbau, etc.). Der überwiegende Anteil der Emissionen ist Stand heute also geogen oder fossil und führt durch CCS primär zu einer Emissionsreduktion, jedoch nicht zu CDR. Lediglich die Abscheidung von biogenen Emissionen, welche aktuell nur einen kleinen Teil ausmachen, kann tatsächlich zu Negativemissionen führen (falls die verwendete Biomasse nachhaltig bewirtschaftet wurde).

Quantitatives Potenzial im Jahr 2050

Potenzial: 350 kt CO₂ / Jahr Reduktion durch CCS und 110 kt CO₂ / Jahr CDR* durch CCS

*plus 15 kt CO₂ CDR durch Klärschlamm von ARAs, welche bereits dort verbucht wurden (siehe Faktenblatt ARA CCS).

Für die Abschätzung des quantitativen Potenzials sind zwei Faktoren besonders entscheidend:

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts. Rasches Handeln, bestmögliche Rahmenbedingungen und grosse Investitionen in Technologie und Infrastruktur sind nötig.

¹ Khaiyum et al. (2023): Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. Sustainability.

² Cemsuisse: Roadmap 2050, S. 6, https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf

-
1. Wie stark der Anteil Klinker reduziert werden kann, beziehungsweise emissionsarme Alternativen eingesetzt werden können. Dadurch können die Restemissionen insgesamt vermindert werden (und dadurch auch das weitere Potenzial durch CCS).
 2. inwiefern biogene Energieträger für die Feuerung eingesetzt werden können.

Es laufen derzeit viele Studien und Versuche zu emissionsärmerem Zement resp. Baustoffarten, mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen, Eigenschaften und Anwendungsfällen. Gemäss der Roadmap 2050 von Cemsuisse³ soll jedoch eine Reduktion der Prozessemissionen pro Tonne Zement von 50% durch den Einsatz alternativer mineralischer Komponenten im Zement und die Reduktion von Klinker möglich ist. Somit verblieben Restemissionen von ca. 345kt CO₂ / Jahr und damit ein CCS-Potenzial von ca. 310kt CO₂ / Jahr auf die geogenen Prozessemissionen.

Als Energieträger werden derzeit noch vorrangig fossile Stoffe eingesetzt (> 80%). Vorrang haben sogenannte Sekundärstoffe wie Altreifen, Altplastik oder Altholz, da im Gegensatz zu vielen anderen Einsatzgebieten von Energieträgern beim Zementbrennen durch die hohen Temperaturen keine hohen Ansprüche an die Qualität oder Reinheit des Brennstoffes gesetzt werden. Theoretisch könnte vermutlich fast das gesamte Material aus biogenen Quellen verwendet werden, was in einem quantitativen CDR-Potenzial von 165kt CO₂ / Jahr resultieren würde. Cemsuisse³ rechnet insgesamt mit einem geringeren Brennstoffbedarf und einer Erhöhung des biogenen Anteils um rund 50% auf rund 75% der gesamten Brennstoffe. Dadurch ergibt sich ein Reduktionspotenzial durch CCS auf den fossilen Anteil von rund 40kt CO₂ / Jahr sowie ein CDR-Potenzial von rund 125kt CO₂ / Jahr auf den biogenen Anteil. Unter der Annahme, dass rund 15kt CO₂ des biogenen Anteils aus dem Klärschlamm der ARAs resultieren und dort bereits angerechnet sind (siehe Faktenblatt ARA CCS), liegt das CDR-Potenzial bei 110kt CO₂ / Jahr.

Permanenz

>1000 Jahre

Die Permanenz hängt massgeblich davon ab, in welcher Form das abgeschiedene CO₂ gespeichert wird. Für die beiden plausibelsten Möglichkeiten, geologische Tiefenspeicherung und in Abbruchzement, kann jedoch eine Permanenz von >1000 Jahre angenommen werden.

Energiebedarf

440 GWh / Jahr

Ein Zementwerk mit Oxyfuel-Technologie braucht rund viermal so viel Strom wie ein herkömmliches Zementwerk, hauptsächlich durch die Sauerstoffaufbereitung⁴. Für die zwei Zementwerke im Kanton Aargau bedeutet das einen erhöhten Strombedarf von rund 440 GWh / Jahr, was über 2% des im Kanton Aargau produzierten Stroms entspricht. Insofern dürfte das Ausschöpfen des Potenzials nur mit Import von Sauerstoff aus Ländern mit Energieüberschuss möglich sein.

Logistikanforderungen

Für die skalierte Anwendung von CCS ist ein nationales und internationales Pipelinennetzwerk vonnöten, um die riesigen Mengen an abgeschiedenem CO₂ (zu den Lagerstätten) zu transportieren. Auf Kantonsebene ist daher ein Anschluss an dieses Netzwerk essenziell. Für die Schätzungen zu Potenzialen und Kosten, wird ein solches Pipelinennetzwerk angenommen.

³ Cemsuisse: Roadmap 2050, S. 9, https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf

⁴ Weber (2024): AC2OCem - Accelerating Carbon Capture using Oxyfuel Technology in Cement Production. Veröffentlicht durch das BAFU.

Kosten im Jahr 2050

160-190 CHF / t CO₂

Die Kosten sind stark davon abhängig, welche Form von Anlage verwendet wird und werden aktuell bei 15 bis 400 USD / t CO₂ eingeschätzt⁵. Eckle et al. (2021)⁶ schätzen die Kosten auf rund 156-190 CHF / t CO₂ inkl. Transport und Lagerung.

Gemäss Weber (2024)⁴ muss pro Tonne Zementklinker (ohne Transport und Speicherung des CO₂) Stand heute mit Mehrkosten von 49 bis 63 EUR gerechnet werden, was bereits heute zu Kosten führt, die ansonsten skaliert bis 2050 angenommen werden. Insofern dürfte Oxyfuel an Zementwerken pro Tonne Zement günstiger im Einsatz sein als andere CCS-Anwendungen.

Abschätzung unsicher:

Siehe «Annahmen» am Ende des Faktenblatts.

Weitere Vor- und Nachteile, Herausforderungen

- + Grundsätzlich ist die Anwendung im Vergleich CCS an anderen Anlagen oder sogar DACCS relativ naheliegend, da es sich hier um wenige, enorm emissionsreiche Punktquellen handelt.
- +/- Die Nutzung von Sekundärstoffen als Brennmaterial vermindert zwar das CDR-Potenzial, substituiert jedoch deutlich schädlichere Lösungen (Verbrennen bei tieferen Temperaturen, Deponien) für die entsprechenden Materialien.
- Braucht sehr grosse initiale Investitionen für die Anschaffung.
- Eine entsprechende Transportinfrastruktur (Pipelines) wird benötigt, um Kostenersparnisse zu erreichen.
- Risiko von Carbon Leakage (Wegzug der Fabriken ins Ausland) durch hohe Kosten bzw. mangelnde Kompetitivität aufgrund Emissionshandelsystem und EU CBAM.
- Geringe technologische Reife der vollständigen Umsetzung (d.h. grosse Mengen, inkl. Endlagerung des CO₂).

Einbettung ins Netto-Null-Ziel des Kantons Aargau:

Die Relevanz der CCS- und CDR-Technologien für den Kanton Aargau beurteilen wir anhand der folgenden Faktoren: quantitatives Potenzial, Einfluss / der Steuerbarkeit der öffentlichen Hand, Machbarkeit, Territorialprinzip und Unsicherheiten.

Stand heute gehen wir davon aus, dass CCS Zement zusammen mit BECCS und CCS KVA eine wichtige Rolle spielen wird, um die Restemissionen im Kanton Aargau zu reduzieren oder auszugleichen. Eine eher ergänzende oder unterstützende Rolle sehen wir bei CCS ARA, Pflanzenkohle, Beschleunigter Verwitterung und DACCS. Eine geringe Relevanz dürften hingegen Technologien im Zusammenhang mit Wald- oder Bodenbewirtschaftung, Holzbau oder Ozeanen haben (siehe ergänzender Bericht, Kapitel 3.2.4).

⁵ Fuss et al. (2018): Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects, Env. Research Letters.

⁶ Eckle et al. (2021). Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste to energy plant. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=44583>

Wichtigste Annahmen

Beschreibung	Risiko, dass die Annahme bis 2050 nicht erfüllt wird. (= Unsicherheit)	Auswirkungen, falls Annahme nicht erfüllt wird.
Lieferkette ist vollständig CO ₂ -neutral.	Sehr hoch	Gesamtpotenzial ↓
Anbindung an ein CO ₂ -Pipelinenetzwerk ist gewährleistet.	hoch	Kosten ↑, Gesamtpotenzial ↓
Für die Abscheidung wird Oxyfuel eingesetzt (anstelle von HPC oder Aminwäsche).	hoch	Energiebedarf ↗, Kosten ↗
Das Potenzial durch verfügbare Biomasse beträgt total ca. 335kt CO ₂ eq (+65kt gegenüber 2021).	hoch	Gesamtpotenzial unklar
Das CO ₂ wird vollständig in geologischen Reservoirn oder Abbruchzement gespeichert.	mittel	Permanenz ↓, Kosten und Energiebedarf unklar
Punktquellen für CCS sind nur in Ausnahmefällen kleiner als 50kt CO ₂ / Jahr.	mittel	keine
Die Abscheidungsrate vom Abgas beträgt mindestens 90%.	tiefe	Gesamtpotenzial ↗