

Schleswig-Holsteinischer Landtag
Umdruck 20/1231

An den
Umweltausschuss Schleswig Holstein
z.Hd.: Heiner Rickers
Vorsitzender des Umwelt- und Agrarausschusses

umweltausschuss@landtag.ltsh.de

Gesprächspartner
Karsten Smid

M +49 171 8780821
karsten.smid@greenpeace.org

Hamburg, 31.03.2023

Betreff: Kein CCS in Schleswig-Holstein und deutschen Küstengewässern in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ); Antrag der Fraktionen von SSW und SPD, Drucksache 20/615 (neu)

Auftrag zur Durchführung einer Expertenanhörung: Wissenschaftliche Erkenntnisse zu CCS berücksichtigen; Alternativantrag der Fraktionen von CDU und BÜNDNIS 90/Die Grünen, Drucksache 20/632

Sehr geehrte Damen und Herren,

gerne nehme ich für Greenpeace die Gelegenheit wahr, Ihnen unsere Position und Einschätzung zu CCS darzustellen.

In unserer Stellungnahme fassen wir den wissenschaftlichen Stand der Debatte und die nach wie vor ungeklärten Risiken der Einführung von CCS aus unserer Sicht zusammen. CCS ist weder nachhaltig noch effizient. CCS ist eine Scheinlösung, die innovative Klimaschutzverfahren blockiert. Deshalb ist für uns wichtig, vor dem Beginn des Aufbaus einer großindustriellen Entsorgungsinfrastruktur mit CCS auch Alternativszenarien zu prüfen, die ohne CCS auskommen. Darüber hinaus halten wir eine breit geführte ergebnisoffene gesellschaftliche Debatte um das Für und Wider der CCS-Technik für zwingend notwendig.

Mit freundlichen Grüßen

Karsten Smid
Klima & Energiekampagne
Greenpeace e.V.

Spendenkonto: GLS Bank, BIC GENODEM1GLS, IBAN DE49 4306 0967 0000 0334 01
Greenpeace ist vom Finanzamt als gemeinnützig anerkannt. Spenden sind steuerabzugsfähig.
Alle Informationen zum Datenschutz finden Sie auf www.greenpeace.de/datenschutz.

Greenpeace Stellungnahme zu CCS

Karsten Smid, Greenpeace e.V.

31.3.2023

Die Carbon Management Strategie (CMS) der Bundesregierung sieht als zentrales Element der industriellen Transformation auf dem Weg zum Netto-Null-Ziel im Jahr 2045 den Hochlauf von Carbon Capture and Storage (CCS) vor. Nach dem Willen der Bundesregierung soll eine großindustrielle Entsorgungsinfrastruktur für CO₂ entstehen. Dabei soll CO₂ verpresst und dauerhaft im tiefen Untergrund deponiert werden. Argumentiert wird mit angeblicher Alternativlosigkeit. Dabei sind zentrale Fragen der CCS-Technologie bis heute ungeklärt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- CCS ist teuer, riskant und ineffizient. Die Verpressung und unterirdische Speicherung von CO₂ kann niemals eine Alternative zur CO₂-Reduktion sein. Die ernüchternde Bilanz zeigt, dass die vielfach postulierten CO₂-Reduktionsversprechen der CCS-Technologie weder heute noch in den kommenden Jahren zu erwarten sind.
- Die Langzeitsicherheit potenzieller CO₂-Deponien ist nicht nachgewiesen. Es entstehen neue systemische Risiken. Ewigkeitslasten werden auf zukünftige Generationen abgeschoben.
- Die CO₂-Endlagerung ist eine Scheinlösung, die der Wirtschaft auf dem Weg zur Klimaneutralität nicht helfen wird.
- In der aktuellen politischen Debatte dient CCS als Vorwand, um den Umbau der Industrie hin zu CO₂-freien Produkten und Produktionsprozessen weiter in die Zukunft zu verschieben.
- Eine auf rein technische Verfahren verengte CO₂-Managementstrategie (CMS) inklusiv dem Aufbau einer großindustriellem CO₂-Entsorgungsinfrastruktur bedient einseitig die Interessen der treibhausgasintensiven Energie –und Schwerindustrie.
- Es fehlt eine ergebnisoffene gesellschaftliche Debatte. Eine frühzeitige Vorfestlegung auf einen bestimmten Technologiepfad wie CCS engt den Handlungsspielraum für den Klimaschutz ein und verhindert Innovationen.

(1) CCS weckt falsche Hoffnungen

CCS im IPCC-Sachstandsbericht

Der jüngst veröffentlichte Synthesebericht des Weltklimarates hat mit erschreckender Klarheit gezeigt, dass wir alles tun müssen, um einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern. Wenn sich nichts ändert, wird die Welt noch in diesem, spätestens aber im nächsten Jahrzehnt die Schwelle von 1,5 Grad Erwärmung überschreiten. Schon jetzt sind 1,1 Grad erreicht, und das Zeitfenster für

Stellungnahme zu CCS

effektives Handeln gegen den Klimakrise schließt sich rapide. Die in diesem Jahrzehnt getroffenen Entscheidungen werden sich für tausende Jahre auswirken. Um schwere Klimafolgen zu verhindern, müssten sofort massive Investitionen in die Klimaschutztechniken wie die Erneuerbaren Energien fließen.

In Bezug auf die CCS-Technik äußert sich der Weltklimarat (IPCC) sehr verhalten. (IPCC 2022) Bei der Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) sind keine nennenswerten Fortschritte zu verzeichnen. Sie spielen zwar in vielen Modellen zur Emissionsreduzierung eine Rolle, lassen sich aber in der Praxis noch immer nicht in großem Maßstab umsetzen. Der IPCC faßt in dem 2022 veröffentlichten Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe 3 zur Emissionsminderung wie folgt zusammen:

- «Die Einführung und Entwicklung von CCS-Technologien (mit umfangreicher Speicherung von abgeschiedenem CO₂) verlief wesentlich langsamer als in früheren Bewertungen prognostiziert.»
- «Die Umsetzung von CCS stößt derzeit auf technologische, wirtschaftliche, institutionelle, ökologische und soziokulturelle Hindernisse.»
- Die technologische Kohlendioxidabscheidung, bei der CO₂ direkt aus der Atmosphäre (DACCS) oder aus Biomasse-Energie (BECCS) abgeschieden wird, spielt in den meisten Klimaschutzmodellen ebenfalls eine Rolle, ist aber in großem Maßstab noch nicht erprobt und ist – wie auch die großflächige Aufforstung – mit Vorbehalten bzgl. Machbarkeit und Nachhaltigkeit belegt.

Überhöhte Erwartungen führen in die Irre

Die Expert:innen von IEEFA haben weltweit 13 verschiedene CCS- und CCUS-Projekte analysiert. Ergebnis: Sieben der untersuchten Projekte erfüllten nicht die Erwartungen, zwei scheiterten und eines wurde aufgegeben. Damit sind mehr als drei Viertel der untersuchten Projekte gescheitert oder hinter den Zielen zurückgeblieben. (IEEFA 2022)

Die Zahl der gescheiterten oder weniger zufriedenstellenden Projekte war deutlich höher als die der erfolgreichen. Erfolgreiche CCUS-Projekte gab es vor allem im Bereich der Erdgasverarbeitung für die fossile Energiewirtschaft, was zu weiteren Emissionen führte. Ein großes Problem bei der Anwendung von CCS/CCUS in der Erdgasverarbeitungsbranche besteht darin, dass Scope-3-Emissionen immer noch nicht berücksichtigt werden und somit Lifecycle-Analysen (LCA) keine Anwendung finden. Abgeschiedener Kohlenstoff wurde hauptsächlich für die verstärkte Ölgewinnung (EOR) verwendet, eine Steigerung der Ölproduktion ist aber keine Lösung für das Klima.

Diese ernüchternde Bilanz zeigt, dass sich die vielfach postulierten CO₂-Reduktionsversprechen der CCS-Technik nicht erfüllt haben. Insgesamt sind die bisherigen Erfahrungen mit der CCS ein Beleg für die Ineffizienz dieser Technologie. Trotz jahrzehntelanger Forschung mit Milliarden Euro an öffentlichen Geldern konnte kein klimarelevanter Nutzen nachgewiesen werden. Das Fazit ist: Es existiert weltweit kein überzeugender Praxis-Beweis, dass die Technologie langfristig funktioniert. Daher ist es fahrlässig, einen wichtigen Pfeiler unserer Klimaschutzpolitik darauf zu verankern.

Falsche Begrifflichkeiten verwässern Schutzstandards

Ob „CO₂-Speicherung“ oder „CO₂-Endlagerung“ der treffende Begriff ist, war von Beginn der Diskussion um CCS heftig umstritten. Dabei ging es nicht um Worte, sondern um eine Kernfrage, die dahinter steckt: Wird deponiertes CO₂ im Rechtssystem als Wirtschaftsgut behandelt? Oder müssen hier die wesentlich strengeren Regeln des Abfallrechts gelten? Im ersten Referentenentwurf vom Januar 2009 hieß das Gesetz „CO₂-Ablagerungsgesetz (CO₂-AblG)“, erst auf Druck der Industrie wurde der Name in „CO₂-Speichergesetz“ geändert. Im CCS-Gesetz wird das deponierte CO₂ nicht mehr als Müll eingeordnet, sondern rechtlich als Wirtschaftsgut umdeklariert. Mit diesem juristischen Trick werden die strengen Umweltauflagen des Abfallrechts umgangen. Das CCS-Gesetz lehnt sich an das laschere Bergrecht an, in dem Umwelt und Sicherheitsrisiken eine untergeordnete Rolle spielen, da es vorrangig um die Ausbeutung von Rohstoffen geht (Smid 2015).

Diese irreführenden Begrifflichkeiten werden heute noch verstärkt durch die Vermischung von CCS und CCU (Carbon Capture and Utilization), also die nach der Abscheidung anschließende Nutzung von CO₂, bei denen das Treibhausgas mindestens einem weiteren Nutzungszyklus zugeführt wird. Im Sinne des Klimaschutzes ist das nicht zielführend. Denn es muss um die drastische Verringerung des Treibhausgases CO₂ auf nahe Null gehen und nicht um das Führen und Managen von CO₂-Abgasströmen in angeblichen Wirtschaftskreisläufen.

Das Umweltbundesamt warnt davor, die Verwendung von Entnahmezertifikaten zu fördern ohne angemessene Sicherheitsvorkehrungen. Diese müssen die Verwendung von Kohlenstoffentnahmeeinheiten begrenzen und hohe Standards für ihre Qualität festlegen. Erfolgt das nicht, könnte der *Carbon Removal Certification Framework* (CRCF) dazu beitragen, die EU auf einen gefährlichen Weg zu bringen, der es ermöglichen würde, echte Emissionsminderung durch unsichere Entnahmezertifikate zu ersetzen. Das ist keineswegs akzeptabel. Denn es besteht ein grundlegender Unterschied zwischen Kohlenstoffentnahme und -reduzierung. Deshalb würde ein solcher Ansatz die Integrität der EU-Klimamaßnahmen untergraben.

Das Umweltbundesamt erachtet zudem als problematisch, dass der Vorschlag der EU-Kommission die geologische Speicherung als dauerhaft definiert, obwohl dafür eine wissenschaftliche Untermauerung fehlt. Die Definition von „Permanenz“ ist unzulänglich. So wird "dauerhafte Kohlenstoffspeicherung" definiert als „eine CO₂-Entnahmetätigkeit, die [...] atmosphärisches oder biogenes CO₂ über mehrere Jahrhunderte speichert". Dabei wird nicht konkretisiert, was "mehrere Jahrhunderte" bedeutet. Die Atmosphärenphysik hat vielfach belegt, dass erhebliche Teile des emittierten CO₂ viel länger als mehrere Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben. Deshalb sollte der Begriff Permanenz logischerweise jene Zeit definieren, die das CO₂ voraussichtlich in der Atmosphäre verbleiben wird. Fazit: Die geologische Speicherung sollte als potenziell nicht dauerhaft angesehen werden. (UBA 2023)

CO₂-Deponie Ketzin – ein gescheitertes Vorzeigeprojekt?

Die CO₂-Testdeponie Ketzin wurde unter Vorspiegelung falscher Tatsachen, der angeblichen „Aufsuchung von Sole“, nach Bergrecht genehmigt, da die Untersuchungsgenehmigung zur Erkundung und dauerhaften Deponierung vor Inkrafttreten des Kohlendioxid-speicher-Gesetzes (KSpG) und damit mangels eines geeigneten Rechtsrahmens beantragt wurde.

Insgesamt wurden zwischen 2008 und 2013 ca. 67.000 Tonnen CO₂ in Ketzin verpresst. Auf wiederholte Nachfrage von Greenpeace beim Projektträger Geoforschungszentrum kam die überraschende Antwort: „Der Projektstandort wird seit 2017 nicht mehr überwacht.“ Zwar steht die CO₂-Deponie noch unter Bergaufsicht, aber ein Monitoring findet nicht mehr statt. (Smid 2023) Anstatt die Deponie Ketzin nach Beendigung der CO₂-Verpressung 40 Jahre lang zu monitoren, wie im CCS-Gesetz vorgeschrieben, wurde sie gerade mal 4 Jahre beobachtet. Auch sind 4 Jahre von 10.000 Jahren ein extrem kurzer Zeitraum, um die Feststellung „das CO₂-Endlager ist dicht“ zu treffen. Ein Beobachtungszeitraum, der einige Jahre beträgt, läßt keine Voraussagen für Jahrhunderte oder Jahrtausende zu.

Folgerichtig wird in der Berichterstattung der Bundesregierung unter der Klimarahmenkonvention die im Untergrund verpresste CO₂-Menge mit Null angegeben, um mögliche Entweichungen zu berücksichtigen. (UBA 2022) Vertrauen für eine langfristige Übernahme von Verantwortung für das CCS-Vorzeigeprojekt Ketzin in Deutschland aufzubauen sieht sicher anders aus. Die gesetzlichen Vorschriften verlangen den vollständigen und dauerhaften Verbleib des Kohlendioxids im Untergrund.

(2) CCS ist eine Risikotechnik

Leckage-Pfade

Bei der Verpressung von CO₂ besteht grundsätzlich das Risiko von Leckagen. Die wichtigsten Leckage-Pfade bei der CO₂-Speicherung sind:

- **Durchlässige Gesteinsschichten:** Gesteinsschichten können durchlässig sein, d.h. das CO₂ kann durch Wegsamkeiten in umliegende Gesteinsschichten gelangen und dann entweichen.
- **Mäßige und schwere Leckagen:** Das abdichtende Deckgestein soll die Speicherformation von der Erdoberfläche trennen. Weisen diese Schichten Risse oder Klüfte auf oder bilden sich durch den Druck neue Risse, kann das CO₂ durch diese Schicht entweichen. Wegsamkeiten, Fehlstellen und Risse können nach Praxiserfahrung sehr unterschiedliche Ausprägungen und Leckraten haben. Solche Leckagen können Jahre und Jahrzehnte andauern.
- **Undichtigkeiten in Bohrlöchern:** Bohrlöcher können während des Injektionsvorgangs beschädigt werden oder im Laufe der Zeit durch Korrosion oder Alterung undicht werden.
- **Aktive Bohrlochleckagen:** Mangelnde oder unzureichende Überwachung kann dazu führen, dass Leckagen nicht rechtzeitig erkannt werden, was zu einem unkontrollierten Austritt von CO₂ führen kann.
- **Blowout:** Bei einer aktiven Bohrung oder einer stillgelegten Bohrung kann es durch einen Defekt zu einem Blowout kommen. Dabei werden innerhalb kürzester Zeit große Mengen CO₂ freigesetzt.
- **Durchsickern von CO₂:** Geringfügiger CO₂-Fluss über geologische Wegsamkeiten im Umfeld einer Lagerstätte, was ein größeres Gebiet betreffen kann. Solche geologischen Lecks sind schwer zu erkennen und zu überwachen.

- **Bohrlochprobleme:** Schwerwiegende Bohrlochprobleme, bei denen eine Reparatur erfolglos bleibt.
- **Leckage in der Anlage:** Bei unsachgemäßer Lagerung oder Handhabung kann CO₂ aus dem Speicher entweichen, aufsteigen und in die Atmosphäre gelangen.
- **Unerwünschte Ausbreitung:** Die tatsächliche Ausbreitung von CO₂ im Untergrund lässt sich nur schwer simulieren. Die Fahne kann sich im Untergrund völlig anders verhalten als prognostiziert.

Die Spannbreite von Leckagen kann einige Tonnen CO₂ pro Tag bis zu mehreren Tausend Tonnen täglich betragen und der Austritt kann sich über Jahre bis Jahrzehnte erstrecken.

Im Rahmen des Forschungsprojektes Geosmart wurde ein Systemsimulationsmodell entwickelt mit vereinfachten Ansätzen zur Risikobewertung von Rissausbreitung, Deckgebirgsintegrität, Reaktivierung von Störungszonen sowie Aufstieg von Formationswasser und injizierten Fluiden. Ziel war es, eine konsistente Methodik zur Risikoabschätzung für die Nutzung des geologischen Untergrundes u.a. für die Speicherung und Entsorgung von CO₂ zu schaffen. Betrachtet wurden die Risiken, die sich aus der Störung der Integrität des Deckgebirges und unkontrolliertem Risswachstum, der Migration von Fluiden aus dem Reservoir in oberflächennahe Aquifere einschließlich Salzwasseraufstieg, induzierter Seismizität und potenzieller Fluidmigration durch Bohrsysteme ergeben.

Dabei wurden die Grenzen der Modellierungssoftware für die Zwecke der Risikoanalyse deutlich. Für die Berechnung detaillierter Modelle, die die Situation im Untergrund gut abbilden, fehlen zum einen ausreichend genaue Eingangsdaten und Parameter, zum anderen ausreichend Rechenkapazitäten, die große 3D-Modelle erfordern. Beides erschwerte eine wirklichkeitsnahe Risikoanalyse auf der Basis eines detaillierten und realistischen Modells. (Geosmart 2021)

Fazit: Eine endgültige Bewertung der Umweltwirkungen der CO₂-Deponierung wird durch offene Fragen bezüglich der Risiken und Eintrittswahrscheinlichkeit erschwert. Dies gilt insbesondere für den unsachgemäßen Betrieb. Die Spannbreite möglicher Auswirkungen ist aufgrund fehlender Informationen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten relativ groß. Damit wird es immer auch eine gesellschaftliche Entscheidung sein, welches Risiko (als Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß) letztlich akzeptabel und damit als signifikantes Risiko anzusehen ist. (UBA 2018)

Umweltwirkungen

Wenn CO₂ aus einer CO₂-Deponie unter dem Meeresboden austritt, kann es verschiedene Auswirkungen haben. Einige der Folgen sind:

- **Sauerstoffverdrängung:** CO₂ ist schwerer als Luft und kann sich in tiefen Bereichen des Meeres ansammeln. Wenn sich das CO₂ in hohen Konzentrationen ansammelt, kann es den Sauerstoffgehalt im Wasser reduzieren, was zu einem Erstickungsrisiko für Fische und andere Meerestiere führen kann.
- **Versauerung des Wassers:** Löst sich CO₂ im Wasser, bildet es Kohlensäure, die den pH-Wert des Wassers senkt. Diese Versauerung des Wassers kann insbesondere Organismen mit Kalkschalen wie Korallen und Muscheln schädigen.

- Schäden an der Meeresumwelt: Gelangt CO₂ aus dem Speicher in die Umwelt, kann es maritime Ökosysteme beeinträchtigen, beispielsweise durch Störungen der Nahrungskette oder geänderte Lebensbedingungen für Tiere und Pflanzen.

Trinkwasser in Gefahr

Das unter hohem Druck in tiefe Sedimentschichten verpresste CO₂ verdrängt Salzwasser. „Das durch die Injektionsmaßnahme unter Überdruck gesetzte Formationswasser wird die erste sich bietende Wegsamkeit (z.B. geologische Störung) nutzen, um in Richtung geringeren Drucks, also nach oben, zu entweichen. ... Die Verdrängung der salinen Formationswässer durch das CO₂ ist keine hypothetische Möglichkeit oder ein „Restrisiko“, sondern sie ist eine zwingende physikalische Folge der CO₂-Verpressung, die mit Sicherheit eintreten wird.“ führte Dr. Krupp in einer CCS-Anhörung aus. (Krupp 2011)

Die mit der Verdrängung des salinaren Tiefenwassers einhergehende unterirdische Druckausbreitung weitet den Einflussbereich einer CO₂-Lagerstätte erheblich aus. Der im Speicherhorizont in salinen Aquiferen durch die Verpressung von CO₂ zusätzliche aufgebaute Druck wirkt sich noch in 100 Kilometer Entfernung aus. Das Salzwasser kann dann an geologischen Störungszonen auch weit entfernt von der Injektionsstelle aufsteigen und das Trinkwasser verunreinigen. Dadurch könnten auch dort saline Formationswässer nach oben gedrückt werden und dort in süßwasserführende Grundwasserstockwerke eindringen, diese versalzen und für die menschliche Nutzung unbrauchbar machen. (Krupp 2011b) Die Versalzung kann erhebliche Schäden bei der Trinkwassergewinnung und in der Landwirtschaft verursachen. Der norddeutsche Wasserverband warnt davor, dass das eingelagerte CO₂ direkt salin角度 Porenwasser verdrängen könnte.

CO₂-Pipelines und Infrastruktur

Auch die zur CO₂-Entsorgung notwendigen Infrastruktur birgt Risiken. Diffuse oder plötzliche CO₂-Austritte können gefährliche Situationen für Umwelt und Menschen hervorrufen. Dies zeigt exemplarisch ein Vorfall in den USA. Am 22. Februar 2020 ereignete sich eine Explosion, gefolgt von einem Bruch der CO₂-Pipeline in Satartia, Mississippi, die von der Firma Denbury Pipeline LLC betrieben wurde. Laut Bericht der Untersuchungskommission strömten rund 10.000 Tonnen CO₂ (31.450 Barrel CO₂) aus der Pipeline und wurden in die Umgebung freigesetzt. (PHMSA 2022) Die Bewohner der Umgebung mussten evakuiert werden. Die Motoren der Fahrzeuge versagten auf Grund des Sauerstoffmangels. 49 Menschen wurden mit schwerer Atemnot ins Krankenhaus eingeliefert. Zum Glück gab es keine Todesfälle. (Huffpost 2021)

Ewigkeitslasten für zukünftige Generationen

Mit der CO₂-Lagerung in geologischen Formationen entstehen neue systemische Risiken. Es werden den zukünftigen Generationen Ewigkeitslasten aufgebürdet, die dauerhafter Kontrolle bedürfen. Nach der üblichen Klassifikation von Risiken handelt es sich um ein Schadereignis, bei

dem weder die Eintrittswahrscheinlichkeit noch das Ausmaß der Schadensfolgen vorhersagbar sind (WBGU 1998) (WBGU-Klassifikation: Risikotyp Pyhtia).

Eine CO₂-Untergrunddeponie muss langfristig auch über Hunderte und Tausende von Jahren ihre Speicherintegrität bewahren, d. h. geologisch in den Deckschichten und technisch in den Bohrungen dicht bleiben. Die Durchführung von dauerhaften, langfristigen Bodenluftmessungen über Hunderte bzw. Tausende von Jahren bleibt wirtschaftlich fragwürdig und ist gegenwärtig juristisch wie organisatorisch ungelöst. Denn kontrolliert werden müssten sowohl die Verschlusskorrosion bei den Bohrlöchern als auch der CO₂ Austritt infolge von Wegsamkeiten in den geologischen Schichten. Eine praktisch sichere Monitoring-Methode für diese Nachbetriebsphase existiert jedoch nicht (GRS 2009).

Der enorme Zeithorizont muss viel stärker problematisiert werden. Insbesondere wurde versäumt, das kumulative Risiko über lange Zeiträume und die damit notwendige Betrachtung von selten auftretenden Extremereignissen in die Risikoabschätzungen einzubeziehen.

Der zusätzlich aufgebaute Druck im Speicherhorizont durch die Verpressung von CO₂ umfasst riesige Flächen - um ein Vielfaches größer als die entstehende CO₂-Fahne. Selbst wenn geologische Störungen von der CO₂-Fahne nicht direkt erreicht werden, können im Einflussgebiet Süßwässer versalzt werden, wenn hydraulische Verbindungen zu höher gelegenen Gesteinsschichten bestehen und versalzene Grundwässer sich druckbedingt aufwärts bewegen. Diese Versalzung der höheren Süßwasser führenden Grundwasserstockwerke kann erhebliche Schäden bei der Trinkwassergewinnung und in der Landwirtschaft verursachen. Der norddeutsche Wasserverband warnt davor, dass das eingelagerte CO₂ direkt salinares Porenwasser verdrängen könnte. Das Porenwasser würde dabei durch den entstehenden Kontakt verunreinigt werden, da grundwasserschädigenden Beimengungen im CO₂ nicht auszuschließen sind. Die mit der Verdrängung des salinaren Tiefenwassers einhergehende unterirdische Druckausbreitung würde den Einflussbereich einer CO₂-Lagerstätte erheblich ausweiten. Diese Ausweitung führt zu Risiken, die derzeit und auch zukünftig nicht kalkulierbar sind (BDEW 2010). Auch der Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft hält die Risiken für die dauerhafte Endlagerung von CO₂ versicherungstechnisch schlichtweg nicht absicherungsfähig (GDV 2010).

CO₂- Endlager

Die Verfechter der CCS-Technik scheuen Parallelen zur Endlagerung von atomaren Abfällen. Und doch gibt es sie. Sie betreffen jedoch nicht die Toxizität im Vergleich zwischen radioaktivem Müll und klimaschädlichem CO₂.

Gemeinsamkeiten bestehen insofern, als es sich um die Entsorgung von Abfallstoffen mit langen geologischen Retentionszeiten handelt, also um die Schaffung von Ewigkeitslasten, um die Beherrschung möglicher Leckagen und um eine rechtliche Beurteilung von Haftungsfragen (Toth 2011). Und nicht zuletzt geht es in beiden Fällen um Endlager und damit um öffentliche Akzeptanz und die Glaubwürdigkeit aller Verfahrensbeteiligten, einschließlich Transparenz ihrer Interessen. So hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) laut einer Agenturmeldung von 1965 (dpa 1965) das Atommüllendlager Asse II als „die sichersten Tresore für den sogenannten Atommüll“ bezeichnet. Dort muss heute – nach nur 40 Jahren – mit Milliardenaufwand der strahlende Atommüll der Energiekonzerne auf Staatskosten aus den

maroden Salzkavernen geborgen werden. Der Untersuchungsausschuss kommt zu dem Ergebnis, dass die Auswahl der Asse als Atommülllager damals grob fahrlässig unter bewußter Ausblendung zu erwartender Risiken geschah (Die Grünen 2012). Kritisiert wird dabei u. a. ein interessengeleitetes Zusammenspiel von Verantwortlichen aus Atomindustrie, Wissenschaft, Verwaltung und Politik (SPD 2012).

Auch im Fall der CO₂-Verpressung arbeitet die BGR eng mit der Industrie zusammen und fällt als unabhängiger Akteur aus. Sicherheitsrelevante Forschungen im Rahmen des CCS-Gesetzesvorhabens wurden in rechtlich fragwürdiger Weise vom BGR mit Finanzierung von RWE (BGR 2010) durchgeführt. Das Projekt wurde erst abgebrochen, nachdem Greenpeace (Smid 2010) die Erarbeitung von untergesetzlichen Regelwerken mit Finanzmitteln der Industrie als inakzeptabel kritisiert hatte.

Erdbeben und induzierte Seismizität

CCS kann aufgrund der großen Nettovolumina der verpressten Fluide ein Potenzial zur Induktion größerer seismischer Ereignisse haben. Das konkrete Risiko der **induzierten Seismizität** in Folge der Verpressung von CO₂ ist derzeit schwierig zu beurteilen. Eine kontinuierliche CO₂ Verpressung mit hohen Injektions-Raten über längere Zeit verursacht einen enormen Druckanstieg im Untergrund, der ganze Regionen anheben kann (Hitzman 2012). Wissenschaftler sehen eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass durch Injektion großer Volumina von CO₂ Erdbeben ausgelöst werden. Bereits kleine bis mittelgroße Erdbeben können wiederum die Dichtigkeit und Integrität des CO₂-Endlagers gefährden. In diesem Zusammenhang kommen sie zu dem Fazit, dass eine groß angelegte CO₂-Verpressung eine riskante und wahrscheinlich erfolglose Strategie für eine signifikante Reduzierung der Treibhausgasemissionen darstellt (Zoback 2012).

Zum Beispiel wurde am 21. März 2022 mit der Stärke 4,5 bis 5,2 das größte Erdbeben seit Jahren vor der norwegischen Westküste gemessen. Die Produktion auf der Ölplattform Snorre B wurde vorsorglich eingestellt. Berichte, ob auch die CO₂-Endlager betroffen waren, liegen nicht vor. Zur Erinnerung: Die CO₂-Deponien müssen über tausende von Jahren ihre Dichtigkeit beibehalten. Untersuchungen am Sleipner Gasfeld in der Utsira-Formation im Jahre 2013 zeigten Störungen im Gestein, so dass ein künftiger Gasaustritt aus dem Reservoir von Kritikern für sehr wahrscheinlich gehalten wird. (Monastersky 2013)

Komplexität geologischer Strukturen wird unterschätzt

Komplexe geologische Strukturen über ein 3-D Erdmodell zu erfassen, bringt erhebliche Unsicherheiten mit sich. Modelle reduzieren die Wirklichkeit. Aussagekräftige numerische Modelle für die CO₂-Injektion und -Speicherung müssen sowohl das gesamte unter Druck gesetzte Grundwassersystem umfassen, als auch kleinste geologische Störungen berücksichtigen. Es besteht die Gefahr, in Modellen die geologische Struktur als „technisch dicht“ zu definieren und weniger ausgeprägte Strukturbrüche sowie bruchtektonische Störungen unzulänglich zu beschreiben (Kreusch 2009). Auch ist das Gefährdungspotenzial durch neotektonische Beanspruchung des gesamten Ablagergebietes mit einzubeziehen. CO₂-Endlager sind auf Grund ihrer zeitlichen

Ablagerungsspanne auch im Hinblick auf die Dichtigkeit über extrem lange Zeiträume zu modellieren.

Der verfügbare Wissenstand zur CO₂-Endlagerung ist dürftig, die Kenntnislücken über Sicherheit und Umweltverträglichkeit dagegen enorm. Im UBA Forschungsbericht wird darauf hingewiesen, dass selbst die Definitionen der CCS-Richtlinie zum Teil widersprüchlich sind und nicht hinreichend, um ein Sicherheitsmanagement belastbar ableiten zu können (UBA 2011). Es gibt Defizite im Verständnis der Transport- und Rückhalteeigenschaften des Deckgebirges, ebenso Defizite hinsichtlich der Prognosesicherheit der Modelle, sowie Defizite der Modelle im Verständnis der relevanten Parameter, ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten und die Relevanz der Parameterverteilungen (petrophysikalisch, geomechanisch und geochemisch). Die thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen Modelle (THMC-Modelle) haben einen extrem **hohen Komplexitätsgrad**. Diese Komplexität führt zu einem eklatanten Widerspruch zu der gesetzlich geforderten Richtigkeit und Präzision der Modellaussagen.

Als besonders gravierend stellt sich die Skalenproblematik heraus: Es existiert ein Widerspruch zwischen der Größe des zu untersuchenden Speicherkomplexes (ca. 20.000 km³) und der Inhomogenität von geologischen Formationen, bei dem sich Leakageprobleme bereits im Bereich von Kubikmetern ergeben können (Faktor 10 hoch 9). Daneben gibt es Probleme mit möglicherweise aufsteigendem Formationswasser, sowie Defizite bei Erfassung und Monitoring der großräumigen Strömungen der Formationswässer. Ungeklärt ist auch, was überhaupt im Leakagefall zu geschehen hat.

Die Ergebnisse des CO₂ReMoVe Projekts zeigen, dass die gesetzlich geforderte Integrität des Endlagers nicht nachgewiesen werden konnte. Beim norwegischen CO₂-Endlagerprojekt „Sleipner“ ist von 10 Mio. t verpresstes CO₂ nur der Verbleib von 8 Mio. t über Monitoring-Methoden (Arts 2010) nachweisbar. Über den Verbleib von 20 Prozent, mithin ein Fünftel liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Weder die Druckwerte am Bohrloch noch die Ausbreitung der CO₂-Fahne (Chadwick 2010) können auch nur annähernd richtig wiedergegeben werden. Das tatsächliche Verhalten des injizierten CO₂ stimmte bei allen untersuchten Projekten Sleipner, Ketzin, In Salah und Snøhvit mit den Ergebnissen der Modellierung nicht überein (Kirk 2012).

(3) CCS ist nicht alternativlos

Restemissionen sind in der Regel vermeidbar

Als unvermeidbare CO₂-Restemissionen werden Emissionen bezeichnet, die sich nicht durch Substitution fossiler Brennstoffe mit Hilfe von erneuerbaren Energien oder durch Änderung des Produktionsprozesses eliminieren lassen. Der Begriff „unvermeidbar“ bezieht sich auf die nach heutigem Kenntnisstand technische Unvermeidbarkeit der Emissionen. Durch Nachfragereduktion, Recycling oder Substitution des Produkts können solche technisch unvermeidbaren Emissionen jedoch auch verringert bzw. fast vollständig vermieden werden.

Industrie und Politik stellen das Vorhaben CCS als alternativlos dar. Es ginge nur um die absolut „unvermeidbaren Restemissionen“. Als Paradebeispiel dient die Zementindustrie, in der produktionsbedingte Prozessemissionen anfallen.

Kein Mangel an CO₂-freien Produktionsprozessen

Doch wie hoch sind die so genannten „unvermeidbaren Restemissionen“? Und sind sie wirklich unvermeidbar? Das sind sie keineswegs, denn die Kernbereiche der industriellen Produktion können auch ohne CCS-Technologie weitgehend dekarbonisiert werden. Allein durch Nachfragereduktion, Recycling oder Produktsubstitution können diese technisch unvermeidbaren Emissionen in der Regel deutlich reduziert oder fast vollständig vermieden werden.

Im Industriesektor kann die Energieversorgung vollständig auf die Nutzung klimafreundlicher erneuerbarer Energien umgestellt werden. Wo hohe Temperaturen benötigt werden, kann regenerativ erzeugter grüner Wasserstoff einspringen.

Bleiben die prozessbedingten Emissionen der Industrie, die mit heutiger Technik etwa ein Drittel zu den Treibhausgasemissionen des Industriesektors beitragen. Aber auch hier ist der Ausstoß von Treibhausgasen nicht alternativlos. In der Stahl-, Chemie- und Bauindustrie mangelt es nicht an nahezu CO₂-freien Verfahren oder Materialien. (Sterner 2023) Hier seien beispielhaft ausgeführt:

- Die Wärme- und Dampferzeugung für eine treibhausgasneutrale Chemieproduktion kann zukünftig CO₂-frei durch den Einsatz von 100 Prozent erneuerbarem Strom erfolgen (Power-to-Heat).
- Eine CO₂-freie Methanolproduktion kann mit grünem Wasserstoff und CO₂ aus nicht-fossilen Quellen (Altkunststoffe, Biomasse) sichergestellt werden.
- Stahl kann im Prinzip unendlich oft recycelt werden. Dieser Sekundärstahl kann zukünftig mit Strom aus erneuerbaren Energien nahezu treibhausgasneutral hergestellt werden.
- Bei der Stahlherstellung durch Direktreduktion mit Wasserstoff entstehen keine prozessbedingten CO₂-Emissionen. Es entsteht Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI), der anschließend in einem Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl erschmolzen wird. Wird der Wasserstoff zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, ist dieser Weg nahezu CO₂-neutral.
- Zement ist ein Bindemittel. Der Einsatz alternativer Bindemittel ermöglicht die Herstellung von Beton ohne den Einsatz von konventionellem Zementklinker, der mit hohen prozessbedingten Emissionen verbunden ist.
- Gebäude aus Holz wirken langfristig als Kohlenstoffsенke für das geerntete Holz. Holzwerkstoffe im Gebäudebau können herkömmliche, schwer zu dekarbonisierende Baustoffe wie Stahl und Beton ersetzen. (Schellnhuber 2022) Dadurch können erhebliche CO₂-Emissionen aus der Zement- und Stahlproduktion vermieden werden. (Mishra 2022)

So schrumpfen die „nicht“ oder nur „schwer vermeidbaren Restemissionen“ durch innovative Lösungen auf ein Minimum zusammen. Die von der Bundesregierung geplante gigantische Entsorgungsinfrastruktur wäre nicht nur völlig überdimensioniert, sondern auch teuer und unattraktiv. Der Aufbau einer großindustriellen CO₂-Entsorgungsinfrastruktur, die die fossile Wirtschaftsweise weiter befeuert, ist bei der Nutzung innovativer Verfahren nicht notwendig. Eine echte industrielle Transformation baut mit neuen Materialien und innovativen Verfahren eine an natürliche Kreisläufe angepasste Bioökonomie auf und kommt ohne die nachgeschaltete großindustrielle Entsorgungsinfrastruktur aus.

Innovative Verfahren

Notwendig ist eine innovationsorientierte Energie- und Industriepolitik, die „starke“ Umweltinnovationen im großen Maßstab auslöst und innerhalb weniger Jahrzehnte die Weichen in Richtung einer CO₂-freien Wirtschaftsweise stellt. Dazu sind Technologiesprünge nötig. Mit den Erneuerbaren Energien und mit grünem Wasserstoff stehen Technologien bereit, die das Potenzial besitzen, etablierte fossile Produktionsverfahren abzulösen. Im Gegensatz dazu ist CCS eine rein nachsorgende End-of-Pipe Technik, die umweltschädliche Verbrennung lediglich um eine nicht nachhaltige Zusatztechnik ergänzt (Jänicke 2012). Diese nachgeschaltete CO₂-Abscheidetechnik hat systemische Nachteile. Das CO₂ wird nicht vollständig aus dem Abgasstrom entfernt und somit gelangt weiterhin CO₂ in die Atmosphäre. Die CO₂-Abscheidung führt zu enormen Effizienzverlusten. Zudem muss das abgeschiedene CO₂ aufwendig über weite Strecken transportiert und entsorgt werden.

Im Technikvergleich gehört CCS wegen des aufwendigen Prozesses der CO₂-Abscheidung gegenüber fossilfreien Verfahren zu den Innovationsverlierern. Fazit: Eine klimaneutrale „Grüne Produktion“ der Zukunft setzt auf innovative Verfahren und neue Materialien statt auf nachgeschaltete End-of-Pipe-Technologien.

Keine einseitige Vorfestlegung auf CCS

Zusammenfassend läßt sich feststellen: Die vom Wirtschaftsministerium (BMWK 2022) postulierte Alternativlosigkeit der Endlagerung von CO₂ im Untergrund ist zur Erreichung des Netto-Null-Ziels für Deutschland im Jahr 2045 nicht gegeben. Das Potenzial natürlicher Senken wurde bisher nicht berücksichtigt. So können Wälder mit nachhaltiger Holzwirtschaft und wiedervernässte Moorflächen so viel Kohlenstoff binden, dass CCS zur Erreichung der Treibhausgasneutralität nicht mehr notwendig ist. Naturbasierte Lösungsansätze, die Biodiversitätsschutz mit Klimaschutz verbinden, werden ausgeklammert. Ebenso müssen Wirtschaftsszenarien Berücksichtigung finden, die Energie und Ressourcen sparen und nicht von einem unbegrenzten Wachstum ausgehen.

Der Weg Deutschlands zur Klimaneutralität schließt die Debatte um den gesellschaftlichen Großkonflikt der CO₂-Endlagerung ein. Das erfordert einen breiten, transparenten und ergebnisoffenen Dialogprozess aller gesellschaftlichen Gruppen. Eine auf technische Verfahrensansätze verengte CO₂-Managementstrategie wird den Risiken nicht gerecht, da sie einseitig, isoliert und im Sinne von Partikularinteressen auf eine CO₂-Entsorgungsinfrastruktur für treibhausgasintensive Energie –und Schwerindustrie abzielt.

Richtschnur zur Technikbewertung muss grundsätzlich die Einhaltung ethischer Standards bleiben. Die Ethik-Kommission „Sichere Energieversorgung“ hat zukunftsweisende Grundsätze zur Technikbewertung formuliert (Töpfer 2011). Diese sind: 1) Vermeidung von „Ewigkeitslasten“, 2) Keine Lasten für zukünftige Generationen nur zugunsten eines kurzfristigen Nutzens, 3) Keine verengende Reduktion der Risiken auf technische Aspekte und 4) Lasten dürfen nicht auf die

Stellungnahme zu CCS

Allgemeinheit abgewälzt werden. Folglich bewertet die Ethik-Kommission die CO₂-Verpressung als „langfristige Sackgasse“.

Mit einer frühzeitigen Vorfestlegung auf einen bestimmten Technologiepfad wie CCS wird der Aktionsraum für Klimaschutz eingeeengt und eine zwingend notwendige ergebnisoffene gesellschaftliche Debatte unterdrückt.

Quellen

(Arts 2010) Arts R et al (2010) Thirteen years' experience of monitoring CO2 injection in the Utsira Sand at Sleipner offshore Norway, TNO Bochum, 19. März 2010

(Chadwick 2010) Chadwick RA, Noy DJ (2010) History – matching flow simulations and time-lapse seismic data from the Sleipner CO2 plume. Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference, London

(BDEW 2010) Bundesverband Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (2010) Stellungnahme der norddeutschen Wasserwirtschaft zur Umsetzung der Richtlinie 2009/31/EG, 21.4.2010, Berlin

(BGR 2010) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2010) Stability-Abschlussbericht: Vorschläge zur Erstellung von Richtlinien für die CO2-Speicherung. 05-0013 Anmerkung zur Förderung von RWE auf Seite 10, Hannover

(BMWK 2022) Evaluierungsbericht zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG), Bericht der Bundesregierung, 21.12.2022

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.html>

(Die Grünen 2012) Bündnis 90/Die Grünen im Niedersächsischen Landtag (2012) Abschlussbericht Parlamentarischer Untersuchungsausschuss zum Atommülllager Asse II, 15.10.2012

(dpa 1965) dpa-Pressemeldung (13. April 1965) Geologen: Salzstöcke sicherste Tresore für „Atommüll“

(GDV 2010) Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) (2010) Stellungnahme des Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. zum Referentenentwurf für ein Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid vom 23.07.2010, Berlin, Brüssel

(Geosmart 2021) GEOSMART - Integrierte Risikoanalyse auf der Grundlage gekoppelter Simulationen für die Nutzung des tiefen geologischen Untergrundes, Projekt-Nr. 30170126, Förderkennzeichen: 03G0867A bis E <https://doi.org/10.2314/KXP:180913272X>

(GRS 2009) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Hrsg) (2009) Langzeitsicherheitliche Bewertung der CO2-Untergrundspeicherung (Projekt CO2-UGS-Risk Abschlussbericht, Mönig J, Kröhn K-P) (GRS – 250)

(Hitzman 2012) Hitzman MW (2012) Induced seismicity potential in energy technologies (Prepublication). The National Academics Press, Washington

(Huffpost 2021) Dan Zegart 26.08.2021, The Gassing Of Satartia https://www.huffpost.com/entry/gassing-satartia-mississippi-co2-pipeline_n_60ddea9fe4b0ddef8b0ddc8f

(IPCC 2022) Sixth Assessment Report WG III, Climate Change 2022, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>

Stellungnahme zu CCS

(Jänicke 2012) M. Jänicke, Megatrend Umweltinnovation. oekom Verlag, München

(Kirk 2012) K. Kirk, CO2-Remove Project-Newsletter. Closing conference – März 2012

(Kreusch 2009) J. Kreusch, Kurzstellungnahme zum Referentenentwurf des CCS-Gesetzes (INTAC im Auftrag von Greenpeace), Hamburg

(Krupp 2011) Ralf E. Krupp am 06.06.2011 vor dem Bundestagsausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Anhörung.

(Krupp 2011b) Ralf E. Krupp, Risiken der Verpressung von Kohlendioxid unter der Nordsee, BUND, Berlin, August 2011

(Mishra 2022) Mishra, A., Humpenöder, F., Churkina, G. et al. Land use change and carbon emissions of a transformation to timber cities. Nat Commun 13, 4889

(2022).<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32244-w>

(PHMSA 2022) PHMSA May 26, 2022, Failure Investigation Report - Denbury Gulf Coast Pipelines LLC <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2022-05/Failure%20Investigation%20Report%20-%20Denbury%20Gulf%20Coast%20Pipeline.pdf>

(Renn 2007) Renn O (2007) Risiko. Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. oekom Verlag, München

(Schellnhuber 2022) H.J. Schellnhuber, Nachhaltige Nutzung von Holz im Bausektor, in: 3 Grad Mehr, oekom-Verlag 2022, ISBN 978-3-96238-369-5

(SPD 2012) SPD-Fraktion im Niedersächsischen Landtag (2012) Abschlussbericht 21. Parlamentarischer Untersuchungsausschuss zur Schachtanlage Asse II, 18.10.2012

(Smid 2010) K. Smid, Schreiben von Greenpeace, Kritik und Stellungnahme Stability-Workshop 8./9.3.2010, vom 30.3.2010

(Smid 2015) K.Smid, Risikotechnik CCS, in M. Fishedick, K. Görner, M. Thomeczek CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung- Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie, Springer Vieweg 2015, ISBN 978-3-642-19527-3

(Smid 2023) Akteneinsicht beim LBGR-Brandenburg nach UIG, Cottbus k30 – 1.1. – 1.5., 1.9. vom März 2023

(Stern 2023), Prof Dr. M. Stern, So retten wir das Klima, Komplet-Media GmbH, 2023, ISBN: 978-3-8312-0563-9

(Toth 2011) F. Toth, Geological disposal of carbon dioxide and radioactive waste: a comparative assessment. Springer, Dordrecht

(Töpfer 2011) K. Töpfer, Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ Endbericht, Juni 2011, Berlin

(IEEFA 2022) B. Robertson, M. Mousavian; The Carbon Capture Crux - Lessons Learned, September 2022, <https://ieefa.org/media/3007/download/>

Stellungnahme zu CCS

(Monastersky 2013) R. Monastersky: Seabed scars raise questions over carbon-storage plan. In: Nature. Band 504, 19. Dezember 2013, ISSN 0028-0836, S. 339–340, doi:10.1038/504339a

(UBA 2011) Umweltbundesamt (2011) UBA-Forschungsbericht 2011 (Draft): Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung – Speicherprozesse, FKZ 3708 49 112 2, nicht veröffentlicht

(UBA 2018) UBA Texte 08/2018, Beschreibung und Bewertung möglicher Auswirkungen einer unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid auf ausgewählte Umweltschutzgüter, Potenzialbewertung nach § 5 des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes, Abschlussbericht <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/beschreibung-bewertung-moeglicher-auswirkungen>

(UBA 2022) UBA 24/2022, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-7>

(UBA 2023) Climate Change 13/2023: Interim Report: Certification of Carbon Dioxide Removals, Evaluation of the Commission Proposal, Project No. (FKZ) 3722 42 515 0 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_13-2023_certification_of_carbon_dioxide_removals.pdf

(WBGU 1998) Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1998) Welt im Wandel – Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Springer, Berlin

(Zoback 2012) Zoback MD, Gorelick SM (2012) Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. Proc Natl Acad Sci U S A 109(26):10164–10168. <https://doi:10.1073/pnas.1202473109>