



Eine Senkung der CO₂-Emissionen geht nicht von heute auf morgen: So werden Erkundungs- und Fördermethoden von fossilen Brennstoffen immer noch staatlich gefördert und dadurch auch kontinuierlich verbessert, so dass sie weiterhin billiger als alternative Energiequellen sind. Ein weiteres Problem: Die Nachwirkungen der früheren Emissionen dürfte noch lange zu schaffen machen, da das CO₂ nur sehr langsam abgebaut wird und in der Atmosphäre eine Verweildauer von über 100 Jahren hat.

Die rettende Idee ... Wie wäre es, wenn man die CO₂-Emissionen auf einer Art Müllkippe deponiert? Einige Forscher waren bei ihrer Suche nach einer Deponie sehr kreativ: Wäre die Tiefsee, wo nichts lebt und wächst, mit ihrer nahezu unbegrenzten Aufnahmekapazität für Kohlendioxid und ihrem extrem langsamen Wasseraustausch mit der Oberfläche nicht ein idealer Ort, um das lästige Treibhausgas zu lösen oder dauerhaft zu speichern?

... **und ihre technische Umsetzung.** Eine Technik ist gefordert, die das Kohlendioxid zunächst aus den Abgasen der Fabriken und Kraftwerken herausfiltert und abtrennt. Das ist jedoch noch relativ teuer. In sogenannten IGCC-Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung (*Integrated Gasification Combined Cycle*) wird das CO₂ bereits vor dem Verbrennungsprozess der Kohle entfernt. Dies geschieht durch eine sogenannte Kohlevergasung (schonende Oxidation der Kohle bei Drücken bis 60 bar), bei der ein wasserstoffreiches Synthesegas erzeugt wird. Aus diesem Gas kann man das CO₂ bei hohen Drücken an Lösungsmittel binden. Anschließend wird das CO₂ komprimiert (verflüssigt) und für den Transport in die Tiefsee mittels Pipelines und Rohren bereitgestellt.

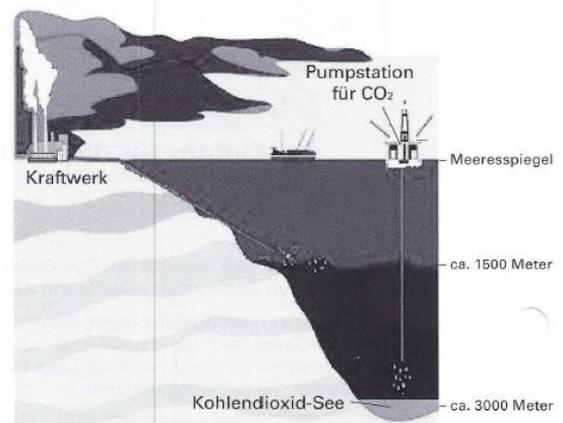


Abb. 1: Möglichkeiten zur Endlagerung von CO₂ im Ozean.

Die Tiefsee -alles andere als unbelebt! Als Tiefsee werden die völlig lichtlosen Bereiche der Meere bezeichnet, die unterhalb einer Tiefe von 800 Metern liegen. Hierzu zählen mehr als 70 % der Fläche der Weltmeere. Früher glaubte man, unterhalb von 800 Metern Meerestiefe sei kein Leben mehr möglich. Als sich WILLIAM BEEBE 1934 vor den Bahamas in einer gepanzerten Kugel 923 Meter tief absenken ließ, entdeckte er jedoch eine neue Welt.

BEEBE entdeckte, dass die Tiefsee alles andere als unbelebt ist. Im Gegenteil: in diesem Lebensraum, in dem Nahrung Mangelware ist, hat die Evolution Erstaunliches vollbracht. Anglerfische senden Lichtsignale, um Beute anzulocken, die Krake *Vitreledonella richardi* und zahlreiche Quallen sind fast transparent, um nicht gesehen zu werden, der Drachenfisch hat riesige Zähne, damit ihm kein Beutetier entkommt. Doch BEEBE hatte nur den obersten Bereich der Tiefsee ergründet- Wie sieht es in einigen Kilometern Wassertiefe aus? Denn pro 10 Meter Wassersäule steigt der Druck um 1013 bar. 1960 gelang dem Schweizer Physiker JACQUES PICCARD ein neuer Rekord: Eine Tauchfahrt auf den Grund des Marianengrabens, der 10912 Meter tief liegt. Was er dort unten sah, war sensationell: Bei einem Druck von über 1 Tonne pro cm² - das entspricht einem Gewicht von 125000 PKW's - und Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt beobachtete er einen Plattfisch! Und dieser war kein Einzelfall. Später wurden unzählige weitere groteske Tierarten in den untersten Bereichen der Tiefsee entdeckt- ganze Lebensgemeinschaften haben sich in diesem Lebensraum gebildet. Hier werden Millionen von Arten vermutet, die alle noch auf ihre Entdeckung warten. Die Tiefsee-Forschung hat gerade erst begonnen.



Exkurs: Von Gas-Hydraten und "brennendem Eis". Zwei Gründe machen eine Einleitung von flüssigem CO₂ in eine Tiefe ab 3000 Metern zumindest technisch möglich: In Tiefen um die 2800 Metern und mehr ist die Dichte von flüssigem CO₂ höher als die des umgebenden Meerwassers, sodass es theoretisch auf den Meeresboden sinken könnte. Interessant ist aber auch, dass CO₂ je nach Meerestiefe und Temperatur in verschiedenen Zustandsformen vorkommt (siehe Abbildung). Ab einer Tiefe von 500 m und einer Temperatur von 2 °C kommt es zur Bildung von festen, eisähnlichen Gas-Hydraten. Je tiefer das CO₂ eingeleitet wird und je niedriger die dort vorherrschende Temperatur, desto höher ist der Anteil an Gas-Hydraten.

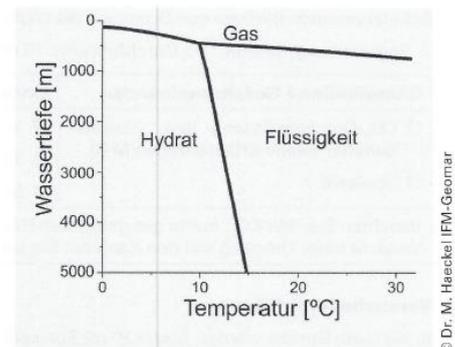


Abb. 1: Bildung von CO₂-Hydraten in Abhängigkeit von Temperatur und Wassertiefe.

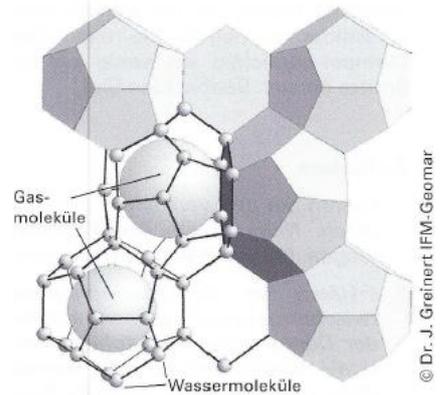


Abb. 2: Struktur von Gas-Hydraten.

Was sind Gas-Hydrate? In Gas-Hydraten sind die einzelnen Wassermoleküle in Form eines festen Gitterkäfigs um ein innen liegendes zentrales Molekül gruppiert. Man nennt diese Verbindungen deshalb auch Einschlussverbindungen (Clathrate *lat. clatratus* = Käfig). Neben CO₂ und H₂S lagern sie vor allem CH₄ (Methan) ein (siehe Abb.). Für die Bildung von Gas-Hydraten ist die Druck-Temperatur-Bedingung ein entscheidender Faktor. Gas-Hydrate sind nur bei *hohem Druck* und *relativ niedrigen Temperaturen* stabil. 90 Prozent der natürlich vorkommenden Hydrate sind Methanhydrate. Bekannt geworden ist Methanhydrat auch unter dem Namen "brennendes Eis", da das beim Zerfall entstehende Methan-Gas brennt. Neueste Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der Erderwärmung ein Auftauen der Permafrostböden zu beobachten ist, in denen Millionen Tonnen Methan in gefrorener Form als Methanhydrat gespeichert sind. Da das Methanhydrat sehr instabil ist, kann bereits ein leichter Anstieg der Wassertemperatur von nur 1 °C zur Zersetzung der Gas-Hydrate führen. Ein Kubikmeter Gas-Hydrat kann bis zu 164 Kubikmeter Gas speichern; so können bei der Zersetzung enorme Mengen Gas aus dem Meeresboden ausbrechen.

Genau dieser Effekt ist, wie Wissenschaftler vermuten, für das ominöse Verschwinden von Schiffen, die sich in der Nähe des berühmten Bermuda-Dreiecks befanden, verantwortlich. Warme Meeresströmungen könnten den Zerfall ausgelöst haben: Das Aufsteigen der dabei entstandenen Gase hatte eine Abnahme der Dichte des Meerwassers zur Folge, was bewirkte, dass Schiffe nicht mehr vom Wasser getragen wurden und sanken.

Blick in die Zukunft: CO₂-Deponien in Meeressedimenten? Ein geplantes Projekt des Instituts für Meeresforschung (IFM-Geomar) in Kiel verfolgt das Ziel der CO₂-Deponierung in tiefliegende Methan-Hydratlagerstätten. Zu diesem Zweck wird flüssiges CO₂ in sehr tief liegende Sedimente gespritzt, in denen sich Methan-Hydrate befinden. Dort belegen die CO₂-Moleküle die Porenräume der Eiskäfige, was zur Zersetzung der Methan-Hydrate führt. Die neu gebildeten CO₂-Hydrate haben den Vorteil, dass sie das CO₂ über einen langen Zeitraum speichern können und über einen größeren Temperaturbereich stabiler als Methan-Hydrate sind. Im Vergleich zu den Methan-Hydraten reagieren sie weniger empfindlich auf die globale Erwärmung.

Das Konzept ist allerdings auf tiefe Methan-Hydrat-Lagerstätten begrenzt (siehe Abb). Sie müssen mit einer mindestens 50 Meter mächtigen Deckschicht aus undurchlässigen Sedimenten versiegelt sein und außerdem in Meerestiefen unterhalb 3000 Metern liegen. Hierdurch soll das unkontrollierte Entweichen von Methan-Gas beim Abbau verhindert werden. Von einer Speicherung in Aquiferen (Grundwasserleitern) ist aus Sicherheitsgründen abzuraten.

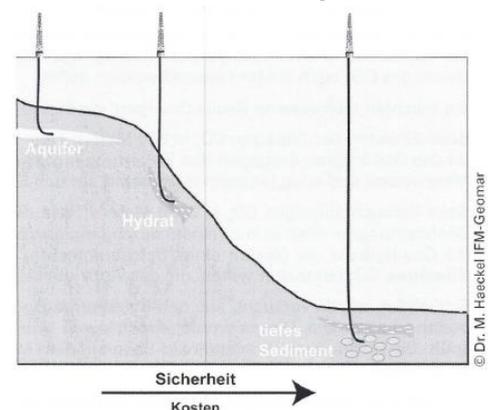


Abb. 3: Überlegungen zur CO₂-Deponierung in Sedimenten.

**Von der Theorie zur Praxis: Probleme bei der CO₂-Deponierung.**

In der Theorie scheint die Deponierung von flüssigem CO₂ in die Tiefsee eine saubere Sache zu sein: Bei Tiefen unterhalb von 3000 Metern ist anzunehmen, dass sich das Kohlendioxid unter dem hohen hydrostatischen Druck dauerhaft verflüssigt bzw. festes Gas-Hydrat bildet. Es soll aufgrund seiner höheren Dichte auf den Meeresboden sinken und dort eine Art zusammenhängenden Kohlendioxid-See bilden. Auch die Gas-Hydrate, die sich bereits bei Tiefen um 600 Metern bilden, sollen aufgrund ihrer höheren Dichte auf den Meeresgrund sinken.

Eine Forschergruppe aus Kalifornien erprobte das Vorhaben mit kleinen Mengen CO₂ im freien Ozean- unter den gleichen Bedingungen und in denselben Meerestiefen, in denen das CO₂ auch später versenkt werden sollte. Sie machten interessante Beobachtungen, die ihre Pläne zunichte machten: Beim Einleiten des flüssigen CO₂ in 600 Metern Tiefe bildete sich zunächst wie erwartet das Gas-Hydrat. Entgegen den Erwartungen schwebte das Gas-Hydrat jedoch im Meerwasser und stieg langsam auf, anstatt auf den Grund zu sinken.

Beim Versuch, flüssiges CO₂ in 3000 Metern Tiefe einzuleiten, machte man ähnliche Beobachtungen: Statt sich zu einem durchgängigen *festen* Block zu formen, nahmen die Gas-Hydrate die Gestalt eines Schwammes an, in dem noch *größere* Bereiche *flüssiges* CO₂ beinhaltet waren, die den Auftrieb des Gemisches verursachten. Schließlich wurde versucht, aus den Behältern ausgelaufenes CO₂ auf dem Meeresboden zu sammeln. Dieses wurde jedoch durch kleinste Wasserströmungen weggespült. Die Hoffnungen, Kohlendioxid-Seen auf dem Meeresboden anzulegen, wurden zerschlagen.

Bei der Gas-Hydratbildung entstanden Schlieren im Wasser: Schlieren bilden sich, wenn Lösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen aufeinandertreffen. Da die Ionen des Meerwassers offenbar nicht in die CO₂-Hydrate aufgenommen werden, bleiben sie im Meerwasser zurück, was zu einer Änderung der Salzkonzentration im Meerwasser führt.

Aufgaben:

1) Erstellen Sie eine Mindmap, in der Sie folgende Fragen aufnehmen.

- Welche Argumente sprechen für, welche Argumente gegen eine Einleitung von CO₂ in die Tiefsee?
- Welche Organismen leben in der Tiefsee und welche Bedingungen herrschen dort? Wie groß ist die Tiefsee bezogen auf unseren gesamten Planeten?
- Welche Folgen hat die CO₂-Deponierung?
- Welche Alternativen gibt es? Nehmen Sie kritisch Stellung zu den alternativen Lösungen.

2) Nehmen Sie dann Stellung zu dem Vorhaben, in der Tiefsee CO₂ zu deponieren!

Beziehen Sie die bisher durchgeführten Versuche mit in die Beantwortung der Fragen ein.



1) Erstellen Sie eine Mindmap, in der Sie folgende Fragen aufnehmen.

- Welche Argumente sprechen für, welche Argumente gegen eine Einleitung von CO₂ in die Tiefsee? (M3-1)
- Welche Organismen leben in der Tiefsee und welche Bedingungen herrschen dort? Wie groß ist die Tiefsee bezogen auf unseren gesamten Planeten? (M3-3)
- Welche Folgen hat die CO₂-Deponierung? (M7-1)
- Welche Alternativen gibt es? Nehmen Sie kritisch Stellung zu den alternativen Lösungen. (M7-3)

M3-1: CO₂ könnte mithilfe von Pipelines vom Land aus in einer Tiefe von 1500-2000 Metern als Tröpfchenwolke deponiert werden. Als weitere Möglichkeit kommen Pumpstationen in Frage, die flüssiges CO₂ in eine Tiefe von über 3000 Meter pumpen, wo sich im Meer Seen aus flüssigem CO₂ bilden sollen.

M3-3: Es ist zu erwarten, dass die Fragen kaum beantwortet werden können. Dieser Effekt ist aber beabsichtigt, weil er zeigt, dass es sich bislang um einen fast unerforschten Lebensraum handelt.

M7-1: Flüssiges Kohlendioxid zeigt sich in Tiefen bis zu 3000 Metern als unberechenbar: Es schwillt zu ungeahnten Volumina an, die wider Erwarten höchst mobil und in ihrer Ausbreitung unkontrollierbar sind.

Statt mit starren "Seen" aus CO₂-Hydraten am Meeresgrund muss damit gerechnet werden, dass das entstehende Gas-Hydrat wegtreibt.

Erwärmung und Schwankungen im Salzgehalt könnten in der Tiefsee lokale Instabilitäten verursachen und das Ökosystem schwer schädigen (siehe Abbildung).

M7-3:

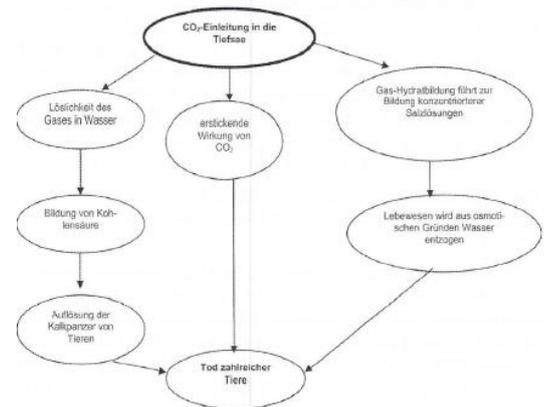
Erhöhung der Energieeffizienz

Umstieg von Kohle auf Erdgas

Ausbau erneuerbarer Energien

Kernenergie

CO₂-Einlagerung in Meeressedimente



2) Nehmen Sie dann Stellung zu dem Vorhaben, in der Tiefsee CO₂ zu deponieren!

Beziehen Sie die bisher durchgeführten Versuche mit in die Beantwortung der Fragen ein.

Siehe Mindmap – schriftlich ausformuliert, mit „Bewertung“.