

31. Das Letzte worüber wir sprechen sollten

◦Einfangen von Kohlendioxid aus der Luft ist das letzte, worüber wir sprechen sollten.

Wenn ich das sage, ist das absichtlich doppeldeutig. Erstens, die Energieerfordernisse für CO₂-Einfang aus der Luft sind so enorm, dass es fast absurd scheint, darüber zu reden (und es besteht die Befürchtung, dass das Hochspielen der Möglichkeit, den Klimawandel durch diese Art des Geo-Engineerings zu heilen, die gegenwärtige Inaktivität noch unterstützt). Zweitens aber denke ich, wir sollten darüber reden, wir sollten nachdenken, wie wir es am besten machen könnten, und den Grundstein für Forschung legen, die zeigt, wie es noch besser gemacht werden könnte. Denn das Einfangen von Kohlendioxid aus der Luft könnte sich als unsere letzte Verteidigungslinie erweisen, wenn der Klimawandel wirklich so schlimm ist, wie die Klimaforscher behaupten, und wenn die Menschheit es nicht schafft, die einfacheren und feinfühligere Möglichkeiten wahrzunehmen, die sich heute noch bieten.



Bevor wir uns mit dem Einfang von CO₂ aus der Luft beschäftigen, müssen wir ein differenzierteres Bild des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben.

CO₂ verstehen

Als ich anfangs dieses Buch plante, war meine Absicht, den Klimawandel gar nicht zu behandeln. In einigen Kreisen war „Gibt es den Klimawandel?“ eine kontrovers diskutierte Frage. Genauso „Ist er durch Menschen verursacht?“ oder „Spielt es eine Rolle?“ Und, angelangt am Ende der Kontroverse „Wie sollten wir damit umgehen?“ Ich fand, dass nachhaltige Energiegewinnung für sich genommen bereits ein fesselndes Thema sei, und es am besten wäre,

diese Kontroversen zu vermeiden. Mein Argument war stets: „Egal wann fossile Energien zur Neige gehen, egal ob es den Klimawandel gibt oder nicht, es ist auf alle Fälle nicht nachhaltig, fossile Brennstoffe zu verbrennen; wie sollten uns vorstellen, nachhaltig zu leben und herausfinden, wie viel nachhaltige Energiegewinnung möglich ist.“

Doch hat sich der Klimawandel ins öffentliche Bewusstsein gedrängt und erzeugt dort alle Spielarten von interessanten Abschätzungsfragen. Also habe ich beschlossen, ihn im Vorwort ein bisschen zu diskutieren und hier im abschließenden Kapitel. Keine umfassende Diskussion, nur ein paar interessante Zahlen.

Einheiten

CO₂-Verschmutzungsabgaben werden üblicherweise in Dollar (oder Euro) pro Tonne CO₂ gemessen, deshalb benutze ich die Tonne CO₂ als Haupteinheit, wenn ich über CO₂-Verschmutzung spreche, und die Tonne CO₂ pro Jahr, wenn es um Verschmutzungsraten geht. (Die Treibhausgas-Emissionen des Durchschnittseuropäers entsprechen 11 Tonnen CO₂ pro Jahr, oder 30 kg CO₂ pro Tag.) Wenn wir aber über Kohlenstoff in fossilen Brennstoffen, Pflanzen, im Boden oder Wasser sprechen, gebe ich Tonnen

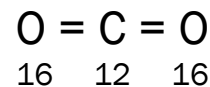


Fig.31.1: Die Gewichte von Kohlenstoff und CO₂ stehen im Verhältnis 12 zu 44, da das Kohlenstoffatom 12 atomare Einheiten und die Sauerstoffatome je 16 atomare Einheiten wiegen. 12 + 16 + 16 = 44.

Kohlenstoff an. Eine Tonne CO₂ enthält 12/44 Tonnen Kohlenstoff, etwas mehr als eine Vierteltonne. Auf weltweiter Skala werde ich über Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C) sprechen. Eine Gigatonne Kohlenstoff ist eine Milliarde Tonnen. Gigatonnen kann man sich schwer vorstellen, man kann sie aber auf eine menschliche Dimension bringen: Stellen Sie sich eine Tonne Kohlen vor (etwa das, was man braucht, um ein Jahr sein Haus zu beheizen). Nun stellen Sie sich vor, jeder würde seine Tonne Kohlen jedes Jahr verbrennen: Das sind 7 Gt C pro Jahr, weil unser Planet 7 Milliarden Menschen beheimatet.

Wo ist der Kohlenstoff

Wo ist der ganze Kohlenstoff? Wir müssen wissen, wie viel in den Ozeanen, im Boden und in der Vegetation ist, verglichen mit dem Kohlenstoff in der Atmosphäre, wenn wir die Konsequenzen von CO₂-Emissionen verstehen wollen.

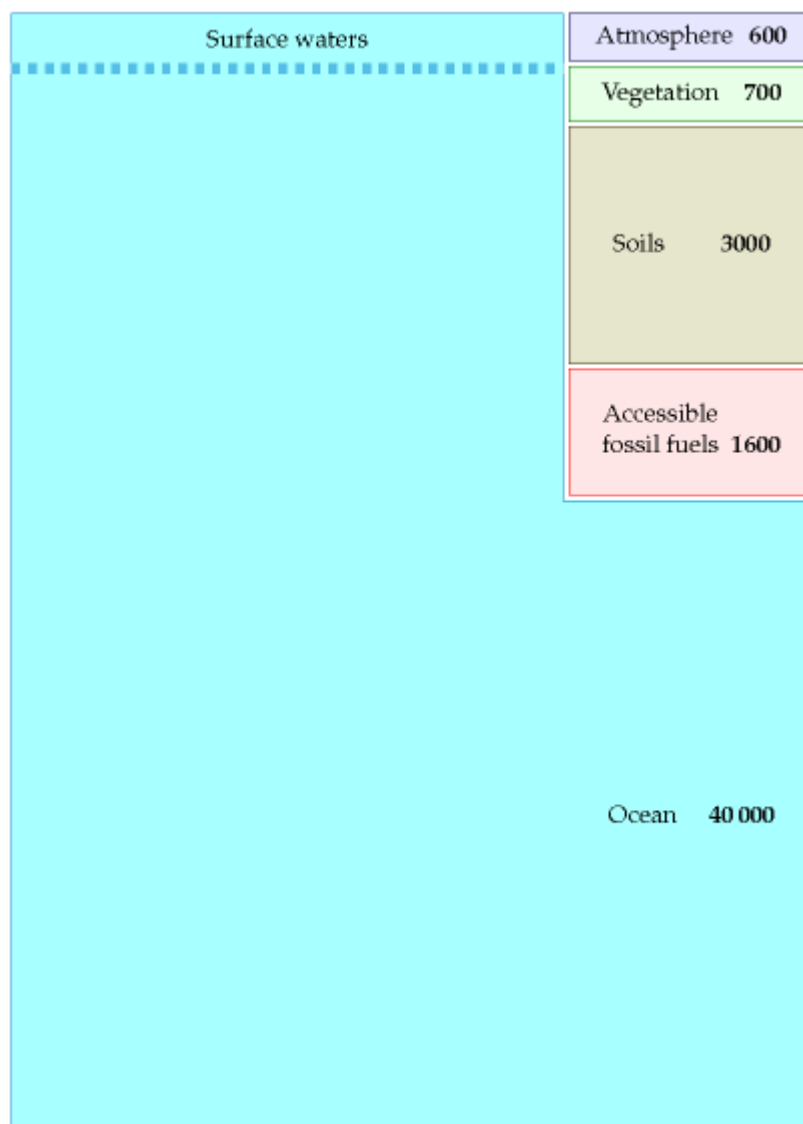


Fig.31.2: Geschätzte Mengen von Kohlenstoff, in Gigatonnen, an zugänglichen Orten der Erde. (Es gibt noch eine ganze Ladung mehr Kohlenstoff im Felsgestein. Dieser Kohlenstoff zirkuliert auf Zeitskalen von Millionen von Jahren, in einem Langzeitgleichgewicht zwischen Kohlenstoff in Sedimenten, die an tektonischen Plattengrenzen nach unten gedrückt werden, und Kohlenstoff, der durch Vulkanausbrüche von Zeit zu Zeit wieder herausbricht. Der Einfachheit halber vernachlässige ich diesen geologischen Kohlenstoff.)

Fig.31.2 zeigt, wo der Kohlenstoff ist. Das meiste – 40.000 Gt – ist im Ozean (in Form von gelöstem CO₂-Gas, Carbonaten, in lebenden Pflanzen und Tieren, und in zerfallendem Material). Böden und Vegetation enthalten zusammen etwa 3.700 Gt. Abbaubare fossile Brennstoffe – hauptsächlich Kohle – enthalten etwa 1.600 Gt. Und die Atmosphäre enthält 600 Gt Kohlenstoff.

Bis vor kurzem waren all diese Kohlenstoffspeicher weitgehend im Gleichgewicht: Alle Ströme aus einem Speicher (also Boden, Vegetation oder Atmosphäre) waren durch gleichgroße Ströme in den Speicher hinein wieder ausgeglichen. Die Ströme in den und aus dem Speicher „fossile Brennstoffe“ waren beide vernachlässigbar. Dann begannen die Menschen, fossile Brennstoffe zu verbrennen und erzeugten so zwei zusätzliche Ströme, die nicht ausgeglichen waren, wie Fig.31.3 zeigt.

Die Rate des fossilen Brennstoffabbrands betrug etwa 1Gt C/y in 1920, 2 Gt C/y in 1955 und 8,4 Gt C in 2006. (Diese Zahlen beinhalten kleinere Beiträge aus der Zementproduktion, die CO₂ aus dem Kalkstein freisetzt.)

Wie hat dieser zusätzliche Strom das Bild von Fig.31.2 modifiziert? Nun, das ist nicht genau bekannt. Fig.31.3 zeigt die wesentlichen Dinge, die bekannt sind. Vieles der zusätzlichen 8,4 Gt C pro Jahr, die wir in die Atmosphäre abgeben, bleibt in der Atmosphäre und erhöht deren Kohlendioxid-Konzentration. Die Atmosphäre bildet relativ schnell wieder ein Gleichgewicht mit dem oberflächen-nahen Ozeanwasser (diese Relaxation dauert nur etwa 5-10 Jahre), wodurch ein Nettostrom von CO₂ aus der Atmosphäre in die Ozeane von etwa 2 Gt C pro Jahr entsteht. (Neuere Forschungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Kohlenstoff-Aufnahme der Ozeane rückläufig sein könnte.) Dieser nicht ausgeglichene Strom in die Oberflächenwasser erhöht die Acidität der Ozeane, was eine schlechte Nachricht für Korallen ist. Einiges an zusätzlichem CO₂ fließt in die Böden und die Vegetation, vielleicht 1,5 Gt C pro Jahr, doch diese Ströme sind nicht zuverlässig gemessen. Weil etwa die Hälfte der Kohlenstoff-Emission in der Atmosphäre verbleibt, wird eine fortgesetzte Verschmutzung mit 8,4 Gt C pro Jahr den CO₂-Gehalt der Atmosphäre weiter ansteigen lassen, wie auch den im Oberflächenwasser.

Was ist das langfristige Ziel dieses zusätzlichen CO₂? Nun, da die Gesamtmenge in fossilen Brennstoffen so viel geringer als die der Ozeane ist, wird „auf lange Sicht“ der zusätzliche Kohlenstoff seinen Weg in die Ozeane finden und die Mengen von Kohlenstoff in Atmosphäre, Vegetation und Boden werden zum normalen Wert zurückkehren. Jedoch bedeutet „auf lange Sicht“ hier tausende von Jahren. Der Ausgleich zwischen Atmosphäre und Oberflächenwasser ist schnell, wie ich bereits sagte, doch Fig.31.2 und 31.3 zeigen eine gestrichelte Trennlinie zwischen Oberflächenwasser und dem restlichen Ozean. Auf einer Zeitskala von 50 Jahren ist diese Grenze eine virtuell feste Wand. Radioaktiver Kohlenstoff, der durch die Atomtests der 1960er und 70er über den Globus verstreut wurde, hat die Ozeane erst bis zu einer Tiefe von 400 m durchdrungen. Die mittlere Tiefe des Ozeans ist dagegen 4000 m.

Die Ozeane zirkulieren langsam: Ein Schluck tiefes Ozeanwasser braucht etwa 1000 Jahre, um zur Oberfläche zu rollen und wieder hinab. Die Zirkulation der tiefen Gewässer

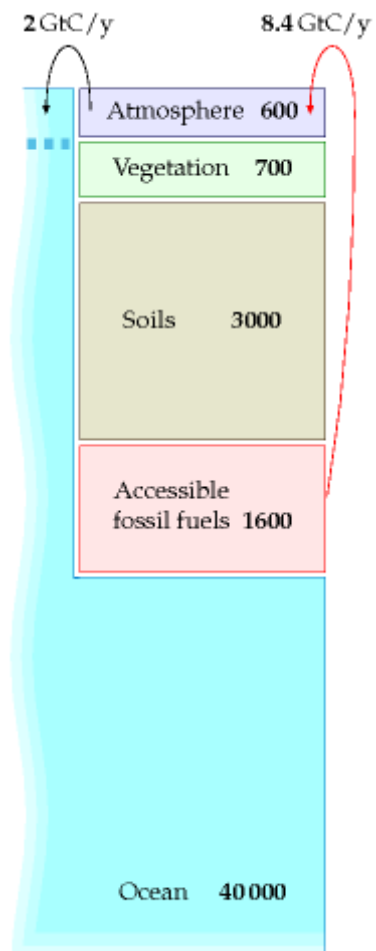


Fig.31.3: Die Pfeile zeigen zwei zusätzliche Kohlenstoffströme, die durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe erzeugt werden. Es ist ein Ungleichgewicht zwischen den 8,4 Gt C/y, das durch fossile Verbrennung in die Atmosphäre gelangt und den 2 Gt C/y, das von den Ozeanen aufgenommen wird. Diese Skizze vernachlässigt die schlecht gemessenen Ströme zwischen Atmosphäre, Boden, Vegetation usw.

ist angetrieben von einer Kombination aus Temperaturgradienten und Salzgehalts-Gradienten, deshalb wird sie auch die thermohaline Zirkulation genannt (im Gegensatz zu den Zirkulationen des Oberflächenwassers, die windgetrieben sind).

Dieses langsame Durchmischen der Ozeane hat eine verhängnisvolle Konsequenz: Wir haben genug fossile Brennstoffe, um unser Klima für die nächsten 1000 Jahre zu beeinflussen.

Wohin geht der Kohlenstoff

Fig.31.3 ist eine grobe Vereinfachung. Menschen verursachen weitere zusätzliche Ströme, die im Diagramm nicht gezeigt sind: Das Verbrennen von Torf und Wäldern in Borneo 1997 setzte allein 0,7 Gt C frei. Zufällig ausbrechende Feuer in Kohleflözen setzen etwa 0,25 Gt C pro Jahr frei.

Trotzdem hilft uns diese Vereinfachung, grob zu verstehen, was kurz- und mittelfristig passieren wird unter verschiedenen Szenarien: Wenn die Verschmutzung der „weiter-wie-bisher“ Linie folgt und man weiterhin 500 Gt Kohlenstoff innerhalb der nächsten 50 Jahre verbrennt, können wir erwarten, dass weiterhin CO₂ in die Oberflächenwasser sickert mit einer Rate von 2 Gt C pro Jahr. Bis 2055 werden mindestens 100 Gt dieser 500 Gt in die Oberflächenwasser übergegangen sein, und die CO₂-Konzentration der Atmosphäre würde etwa das Doppelte ihres vorindustriellen Wertes erreichen.

Würde das Verbrennen fossiler Brennstoffe bis 2050 auf null reduziert werden, würde sich der 2Gt Strom von der Atmosphäre in die Ozeane ebenfalls signifikant reduzieren. (Ich dachte zunächst, dieser Strom würde für Jahrzehnte anhalten, doch wäre das nur der Fall, wenn Atmosphäre und Oberflächenwasser aus dem Gleichgewicht sind; doch wie erwähnt relaxiert Atmosphäre und Oberflächenwasser innerhalb weniger Jahre.) Vieles der 500 Gt C, die wir in die Atmosphäre freisetzen, wird nur schrittweise in die Ozeane driften über die nächsten paar tausend Jahre, wenn die Oberflächenwasser nach unten zirkulieren und durch neue Wasser aus der Tiefe ersetzt sind.

Auf diese Weise wird unsere Störung der Kohlenstoff-Konzentration möglicherweise korrigiert, jedoch erst nach Tausenden Jahren. Dabei wird vorausgesetzt, dass die lange Störung der Atmosphäre das Ökosystem nicht wesentlich verändert. Es ist beispielsweise denkbar, dass die Erhöhung der Acidität im Oberflächenwasser eine ausreichende Reduktion ozeanischer Flora verursacht, dass ein neuer Teufelskreis angestoßen werden könnte: Höhere Acidität bedeutet geringeres Pflanzenwachstum, das bedeutet weniger Pflanzen, die CO₂ aus dem Ozean absorbieren, das bedeutet, die Acidität der Ozeane steigt noch weiter. Solche Teufelskreise (die von Wissenschaftlern „verstärkende Rückkopplung“ genannt werden) gab es schon früher auf der Erde: man glaubt beispielsweise, dass die Eiszeiten verhältnismäßig rasch endeten wegen der verstärkenden Rückkopplung, in der höhere Temperaturen Schnee und Eis schmelzen ließen, was die Reflektion von Sonnenlicht am Boden reduzierte, was bedeutet, dass der Boden mehr Wärme absorbiert, was wiederum zu steigenden Temperaturen führte. (geschmolzener Schnee – Wasser – ist viel dunkler als gefrorener Schnee.) Eine andere

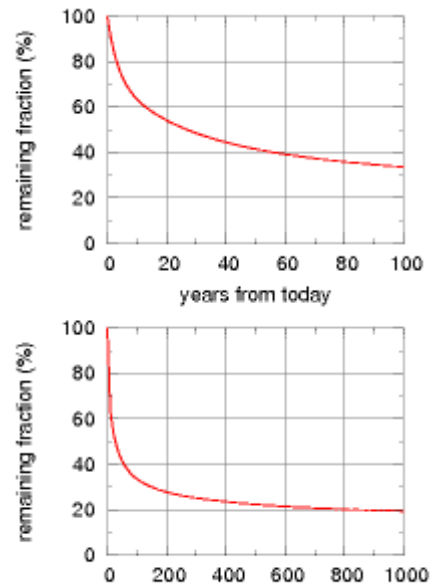


Fig.31.4: Abfall eines schmalen Pulses von CO₂, das in die heutige Atmosphäre emittiert wird, nach dem Bern Modell des Kohlenstoffzyklus. Quelle Hansen et al. (2007).

Möglichkeit zu verstärkender Rückkopplung, um die man sich sorgt, involviert Methanhydrat, das gefroren in Mengen von einigen Gigatonnen an Plätzen wie Nord-Sibirien und in Mengen von 100en Gigatonnen an den Kontinentalschelfen liegt. Globale Erwärmung über 1 °C könnte Methanhydrat schmelzen, was Methan in die Atmosphäre freisetzt, und dieses Methan erhöht die globale Erwärmung noch stärker als CO₂.

Dies ist nicht der Ort, wo ich die Unsicherheiten des Klimawandels noch detaillierter diskutieren möchte. Ich empfehle wärmstens die Bücher *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber et al., 2006) und *Global Climate Change* (Dessler und Parson, 2006), und auch die Artikel von Hansen et al. (2007) und Charney et al. (1979).

Die Intention dieses Kapitels ist, die Idee des Kohlenstoff-Einfangs aus der Luft als Heilmittel gegen den Klimawandel zu diskutieren; wir diskutieren die Energiekosten dieses Einfangs als nächstes.

Die Kosten des Einfangs

Heute ist Kohlenstoff aus dem Boden zu pumpen ein großes Geschäft. In Zukunft wird vielleicht Kohlenstoff *in* den Boden zu pumpen ein großes Geschäft sein. Unter der Annahme, dass jetzt nicht die richtigen Maßnahmen eingeleitet werden, um die globale Verschmutzung aufzuhalten, wird vielleicht in ein paar Jahrzehnten eine „Koalition der Willigen“ dafür bezahlen, einen großen Staubsauger zu bauen und den ganzen Schmutz sauberzumachen.

Bevor wir in die Details gehen, wie man Kohlenstoff aus der Luft einfangen kann, wollen wir die unausweichlichen Energiekosten des Einfangs bestimmen. Welche Technologie wir auch immer benutzen, wir müssen die Gesetze der Physik respektieren, und leider benötigt das Einfangen und Konzentrieren von CO₂ Energie. Die Gesetze der Physik sagen, dass die benötigte Energie mindestens 0,2 kWh pro kg CO₂ beträgt (Tabelle 31.5). Bedenkt man, dass reale Prozesse typischerweise bestenfalls 35 % effizient sind, würde es mich wundern, wenn die Energiekosten für CO₂-Einfang je unter 0,55 kWh pro kg gesenkt werden könnten.

Lassen Sie uns nun annehmen, wir wollten den CO₂-Ausstoß eines typischen Europäers neutralisieren, 11 Tonnen pro Jahr, was 30 kg pro Tag pro Person entspricht. Die dafür erforderliche Energie, angenommen die Kosten liegen bei 0,55 kWh pro kg CO₂, ist **16,5 kWh/d pro Person**. Das ist exakt der **englische Elektrizitätsverbrauch**. Diesen gigantischen Staubsauger zu betreiben würde also eine Verdopplung unserer Elektrizitätsproduktion erfordern – oder zumindest, dass wir irgendwo Leistung äquivalent zu unserer Elektrizitätsproduktion hernehmen.

Wenn wir die Kosten für den Betrieb des gigantischen Staubsaugers reduzieren können, lasst uns das machen. Doch kein Aufwand an Forschung oder Entwicklung kann die Gesetze der Physik umgehen, die sagen, dass CO₂-Einfang mindestens 0,2 kWh pro kg CO₂ erforderlich macht.

Was ist jetzt die beste Methode, um CO₂ aus der Luft zu saugen? Ich werde vier Technologien diskutieren, um einen gigantischen Staubsauger zu bauen:

- A. chemische Pumpen
- B. Bäume
- C. Beschleunigte Verwitterung von Steinen
- D. Ozeandüngung.

A. Chemische Technologien zum Kohlenstoffeinfang

Die chemischen Technologien gehen mit dem CO₂ üblicherweise so um:



Zuerst konzentriert man das CO₂ von seiner niedrigen Konzentration in der Atmosphäre; dann komprimiert man es in ein kleines Volumen, das man dann irgendwo (entweder in einem Erdloch oder in den Tiefen des Ozeans) vergraben kann. Jeder der beiden Schritte hat Energiekosten. Die Kosten aufgrund physikalischer Gesetze zeigt Tabelle 31.5.

	Kosten (kWh/kg)
Konzentration	0,13
Kompression	0,07
gesamt	0,20

Tabelle 31.5: Die unausweichlichen Energiekosten für Konzentration und Kompression von CO₂ aus der Luft



Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO₂-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient: die Energiekosten lagen bei 3,3 kWh pro kg, die finanziellen Kosten bei 140 \$ pro Tonne CO₂. Bei diesen Energiekosten erfordert der Einfang der täglichen 30 kg eines Europäers **100 kWh pro Tag** – fast dasselbe wie sein Energieverbrauch von 125 kWh/d. Kann man bessere Staubsauger designen?

Kürzlich hat der Klimatologe Wallace Broecker, „der vielleicht Weltbeste im Interpretieren der Funktion der Erde als biologisches, chemisches und physikalisches System“, eine bis dahin unbekannte CO₂-Einfang-Technologie vorgestellt, die der Physiker Klaus Lackner entwickelte: Broecker stellt sich vor, dass die Erde weiterhin fossile Brennstoffe mit der selben Rate wie bisher verheizt, und 60 Millionen CO₂-Schrubber (jeder so groß wie ein großer Überseecontainer) das CO₂ aufsaugen. Welche Energie benötigt Lackners Prozess? Im Juni 2007 erzählte mir Lackner, dass sein Labor 1,3 kWh pro kg erreichte, doch seitdem entwickelten sie einen neuen Prozess basierend auf einer Rosine, die trocken CO₂ absorbiert und CO₂ abgibt, wenn sie feucht ist. Lackner erzählte mir im Juni 2008 dass er in einem trockenen Klima die Kosten für die Konzentration auf 0,18-0,37 kWh niederstufiger Wärme pro kg CO₂ reduziert hätte. Das Komprimieren kostet 0,11 kWh pro kg. Somit ist Lackners Gesamtenergieaufwand 0,48 kWh/kg oder darunter. Für die Emissionen eines Europäers reden wir immer noch über **14 kWh/d**, von denen **3,3 kWh pro Tag** Elektrizität wären, die restlichen Wärme. Ein Hoch auf den technischen Fortschritt! Doch denken Sie nicht, dass das geringe Kosten wären. Wir würden etwa 20% Zuwachs der weltweiten Energieproduktion benötigen, nur um die Staubsauger zu betreiben.

B. Wie sieht's mit den Bäumen aus?

Bäume sind Kohlenstoff-Einfangssysteme: Sie saugen CO₂ aus der Luft, und sie verletzen keine physikalischen Gesetze. Sie sind zwei-in-einer Maschinen: Sie sind CO₂-Einfanganlagen angetrieben durch eingebaute Solarkraftwerke. Sie fangen CO₂ mit der Energie ein, die sie vom Sonnenlicht erhalten. Die fossilen Brennstoffe, die wir verbrennen, wurden ursprünglich durch diesen Prozess erzeugt. Also ist die Idee, das

Gegenteil der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu machen. Wie wäre es, Holz zu erzeugen und in einem Loch im Boden zu vergraben, während eine Tür weiter die Menschheit weiterhin fossiles Holz ausgräbt und einheizt? Die Vorstellung erscheint unausgegoren, vergrabenes Holz zu erzeugen und gleichzeitig vergrabenes Holz wieder auszugraben. Trotzdem, lassen Sie uns die Landflächen ausrechnen, die erforderlich sind, um das Klima mit Bäumen zu retten.

Die besten Pflanzen in Europa binden etwa 10 Tonnen trockenes Holz pro Hektar pro Jahr – äquivalent zu etwa 15 t CO₂ pro Hektar und Jahr. Um den europäischen Pro-Kopf-CO₂-Ausstoß von 11 Tonnen CO₂ pro Jahr auszugleichen benötigt man pro Person eine Fläche von 7.500 m². Dies ist doppelt so viel wie die pro-Kopf-Fläche in Deutschland. Und dann müsste man einen Platz finden, an dem man permanent 7,5 Tonnen Holz pro Person und Jahr lagern könnte! Bei einer Dichte von 500 kg pro m³ würde das Holz einer Person 15 m³ pro Jahr belegen. Das Holz einer Lebensspanne – das, erinnern Sie sich, sicher endgelagert werden muss und nicht verbrannt werden darf – würde 1000 m³ füllen. Das ist fünfmal das Volumen eines ganzen Hauses. Wenn jemand vorschlägt, Holz gegen den Klimawandel zu verwenden, muss er realisieren, dass landesgroße Anlagen erforderlich sind. Ich kann nicht sehen, wie das jemals funktionieren sollte.

C. Verstärkte Verwitterung von Felsen

Gibt es einen trickreichen Weg, die signifikanten Energiekosten des chemischen CO₂-Einfangs zu vermeiden? Hier ist eine interessante Idee: Man zermahle Gestein, das CO₂ absorbieren kann, und lege es an die freie Luft. Diese Idee kann als Beschleunigung eines natürlichen geologischen Prozesses gesehen werden. Lassen Sie mich das erklären.

Zwei Kohlenstoff-Ströme, die ich in Fig.31.3 weggelassen hatte, sind der vom Gestein in die Ozeane im Zusammenhang mit der Verwitterung des Gesteins und der natürliche Niederschlag von Kohlenstoff in ozeanische Sedimente, die wieder zu Gestein werden. Diese Ströme sind relativ klein, etwa 0,2 Gt C pro Jahr (0,7 Gt CO₂ pro Jahr). Sie sind damit auch vernachlässigbar gegen derzeitige menschliche Kohlenstoffemissionen, die etwa 40mal größer sind. Doch die Behauptung der Befürworter dieser verstärkten Verwitterung ist, dass wir den Klimawandel stoppen könnten, wenn wir die Rate, mit der Stein gebrochen wird und CO₂ absorbiert, beschleunigen. Die dafür geeigneten Gesteine beinhalten Olivine oder Magnesiumsilikat, was beides weit verbreitet ist. Die Idee wäre, Minen zu finden an Plätzen, die von vielen Quadratkilometern Land umgeben wären, auf das man die gebrochenen Gesteine ausbringen kann, oder vielleicht auch das Bruchgestein direkt im Meer zu verteilen. In beiden Fällen würde das Gestein CO₂ absorbieren und in Carbonate verwandeln, die am Ende in die Ozeane gespült werden. Das Gestein in ausreichend kleine Körner zu zermahlen erfordert **nur 0,04 kWh pro kg gebundenes CO₂**. Halt, ist das nicht kleiner als die 0,20 kWh pro kg, die die Gesetze der Physik vorschreiben? Ja, doch es ist nichts falsch: das Gestein selbst liefert die fehlende Energie: Silikate haben höhere Energie als Carbonate, daher zahlt das Gestein die Energie für das Binden des CO₂. Ich liebe die kleinen Energiekosten dieses Verfahrens, doch die schwierige Frage ist, wer ist der Freiwillige, der sein Land mit Gesteinsmehl überziehen lässt?

D. Ozeandüngung

Das Problem mit diesen chemischen Methoden, Baumwachstums-Methoden und Gesteinszermahlungs-Methoden zum CO₂-Erfang ist, dass alle eine Menge Arbeit

bedeuten, die keiner leisten mag – so lange nicht ein internationales Abkommen für diesen Einfang bezahlt. Momentan sind die CO₂-Preise zu niedrig.

Eine letzte Idee zum CO₂-Einfang könnte dieses Problem umgehen. Die Idee ist, den Ozean zu überreden, etwas schneller Kohlenstoff einzufangen als normal, als Nebenprodukt der Fischzucht.

Einige Gegenden der Welt haben Lebensmittelknappheit. Es gibt Fischmangel in einigen Gegenden wegen der Überfischung in den letzten 50 Jahren. Die Idee der Ozeandüngung ist, die Basis der Nahrungskette zu stärken, was die Ozeane dazu befähigt, mehr pflanzliches und tierisches Leben hervorzubringen, und damit mehr Kohlenstoff zu binden. Meeres-Ingenieure unter der Leitung des australischen Wissenschaftlers Ian Jones würden gerne stickstoffhaltigen Dünger wie Harnstoff in geeignete fischarme Teile des Ozeans pumpen. Sie behaupten, dass man ein Areal von 900 km² Ozean so düngen kann, dass er 5 Mt CO₂/y aufnehmen kann. Jones und Kollegen rechnen, dass der Düngungsprozess für alle stickstoffarmen Gebiete des Ozeans geeignet ist. Das beinhaltet den größten Teil des Nordatlantiks. Zeichnen wir diese Idee in eine Landkarte ein. Deutsche Kohlenstoffemissionen liegen bei 800 Mt CO₂/y. Ihre vollständige Neutralisierung würde demnach 160 der o.g. Areale erfordern. Die Karte in Fig.31.6 zeigt 120 dieser Areale maßstabsgetreu neben den britischen Inseln. Wie gewöhnlich, braucht ein Plan, der aufgeht, landesgroße Anlagen. Und wir haben noch gar nicht die Frage berührt, wie der ganze Harnstoff hergestellt werden soll.

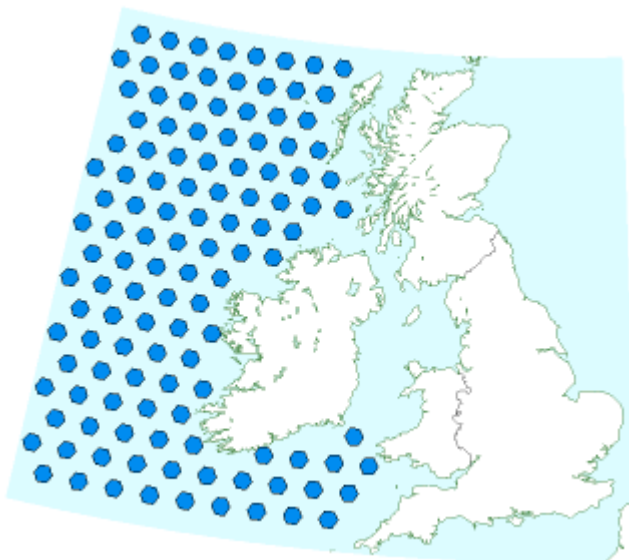


Fig.31.6: 120 Areale im Atlantik, jedes 900 km². Sie bilden die schätzungsweise erforderliche Fläche zur Neutralisierung der britischen Emissionen durch Ozeandüngung

Obwohl es eine ungeprüfte Idee ist, und derzeit illegal, finde ich die Ozeandüngung interessant, weil sie im Gegensatz zur geologischen Kohlenstofflagerung eine Technologie ist, die auch ohne große internationale Geldmittel implementiert werden könnte; Fischer würden den Ozean düngen, nur um mehr Fisch fangen zu können.

Man kann vorhersagen, dass Berichterstatter die Manipulationen am Ozean verdammen werden, weil sie die Unsicherheiten statt des möglichen Nutzens in den Vordergrund stellen werden. Sie werden mit der Furcht der Öffentlichkeit vor dem Unbekannten spielen. Die Leute akzeptieren gerne eine Eskalation bestehender Praxis (z.B. CO₂ in die Atmosphäre zu blasen) sorgen sich aber um Innovationen, die ihre Zukunft verbessern könnten. Sie haben eine einseitige Abneigung gegen Risiko.

Ian Jones

Wir, die Menschheit, können nicht das ganze, oder wenigstens das meiste, CO₂ fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre entlassen. Das wäre eine Garantie für dramatische Klimaveränderungen, die zu einem ganz anderen Planeten führten. . .

J. Hansen et al (2007)

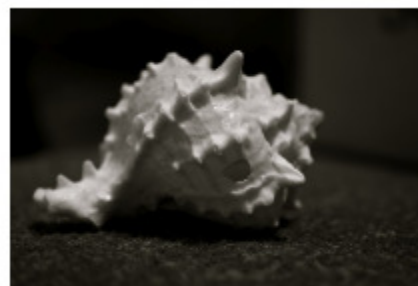
“Gefährliche Klimaveränderungen vermeiden” ist unmöglich, wir haben bereits gefährliche Klimaveränderungen. Die Frage ist: können wir katastrophale Klimaveränderungen vermeiden?

David King, UK Chief Scientist, 2007

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

265 In einigen Kreisen war „Gibt es den Klimawandel?“ eine kontrovers diskutierte Frage. Tatsächlich gibt es immer noch “einen großen Unterschied zwischen der herrschenden Meinung der Bildungseliten von Europa und Amerika” [voxbz].



265 Wo ist der ganze Kohlenstoff? Quellen: Schellnhuber et al. (2006), Davidson and Janssens (2006).

266 Die Rate des fossilen Brennstoffabbrands Quelle: Marland et al. (2007).

266 Neuere Forschungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Kohlenstoff-Aufnahme der Ozeane rückläufig sein könnte Siehe www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré et al. (2007).

266 Weil etwa die Hälfte der Kohlenstoff-Emission in der Atmosphäre verbleibt –roughly half of the carbon emissions are staying in the atmosphere. Man braucht 2,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in der Atmosphäre (7,5 Gt CO₂), um die atmosphärische CO₂-Konzentration um ein Millionstel (1 ppm) anzuheben. Würde das ganze in die Atmosphäre gepumpte CO₂ dort bleiben, würde die Konzentration um mehr als 3 ppm pro Jahr steigen – doch sie steigt tatsächlich nur um 1,5 ppm pro Jahr.

266 Radioaktiver Kohlenstoff ... hat die Ozeane erst bis zu einer Tiefe von 400 m durchdrungen. Der Mittelwert für die Eindringtiefe von ¹⁴C aus Atombomben liegt

für alle Ende der 1970er Jahre untersuchte Standorte bei 390 ± 39 m (Broecker et al., 1995). Siehe [3e28ed].

- 268 **Erwärmung über 1 °C könnte Methanhydrat schmelzen** Quelle: Hansen et al. (2007, S. 1942).
- 269 **Tabelle 31.5 Unausweichliche Kosten für Konzentrieren und Komprimieren von CO₂ aus der Luft:** Die unausweichlich benötigte Energie für das Konzentrieren von 0,03% auf 100% bei Atmosphärendruck ist $kT \ln 100/0.03$ pro Molekül, das sind 0,13 kWh pro kg. Bei idealer Kompression von CO₂ auf 110 bar (den Druck der für geologische Speicherung genannt wird) fallen an Energiekosten 0,067 kWh/kg an. Also sind im Idealfall die Energiekosten für Einfang und Kompression des CO₂ bei 0,2 kWh/kg. Nach Angaben des *IPCC special report on carbon capture and storage*, liegen die tatsächlichen Energiekosten für den zweiten Schritt, die Kompression des CO₂ auf 110 bar bei 0,11 kWh pro kg. (0,4 GJ pro t CO₂; 18 kJ pro Mol CO₂; 7 kT pro Molekül.)
- 269 **das man dann in einem Erdloch oder in den Tiefen des Ozeans vergraben kann** Vgl. Williams (2000). "Damit ein großer Anteil des injizierten CO₂ im Ozean verbleibt, muss die Injektion in großer Tiefe erfolgen. Es herrscht Konsens in der Entwicklung, dass die beste kurzfristige Strategie Injektionstiefen für das CO₂ von 1000–1500 m anstrebt, was mit bereits bestehender Technologie durchgeführt werden kann." Siehe auch den IPCC-Bericht: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- 269 **Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO₂-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient** Quellen: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David und Herzog (2000).
- 269 **Klimatologe Wallace Broecker** www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html. Sein Buch über künstliche Bäume: Broecker and Kunzig (2008).
- 270 **Die besten Pflanzen in Europa binden etwa 10 Tonnen trockenes Holz pro Hektar pro Jahr** Quelle: Select Committee on Science and Technology.
- 270 **Verstärkte Verwitterung von Felsen** Siehe Schuiling and Krijgsman (2006).
- 270 **Ozeandüngung** Siehe Judd et al. (2008). Siehe auch Chisholm et al. (2001). Die Risiken der Ozeandüngung sind hier beschrieben: Jones (2008).