

## 31. Das Letzte worüber wir sprechen sollten

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

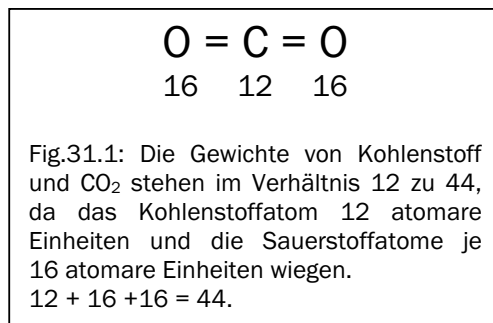
Wenn ich das sage, ist das absichtlich doppeldeutig. Erstens, die Energieerfordernisse für CO<sub>2</sub>-Einfang aus der Luft sind so enorm, dass es fast absurd scheint, darüber zu reden (und es besteht die Befürchtung, dass das Hochspielen der Möglichkeit, den Klimawandel durch diese Art des Geo-Engineerings 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 CO<sub>2</sub> aus der Luft beschäftigen, müssen wir ein differenzierteres Bild des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben.

### CO<sub>2</sub> 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*

CO<sub>2</sub>-Verschmutzungsabgaben werden üblicherweise in Dollar oder Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> gemessen, deshalb benutze ich die Tonne CO<sub>2</sub> als Haupteinheit, wenn ich über CO<sub>2</sub>-Verschmutzung spreche, und die Tonne CO<sub>2</sub> pro Jahr, wenn es um Verschmutzungsraten geht. (Die Treibhausgas-Emissionen des Durchschnittseuropäers entsprechen 11 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr, oder 30 kg CO<sub>2</sub> pro Tag.) Wenn wir aber über Kohlenstoff in fossilen Brennstoffen, Pflanzen, im Boden oder Wasser sprechen, gebe ich Tonnen Kohlenstoff

an. Eine Tonne CO<sub>2</sub> 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 6 Gt C pro Jahr, weil unser Planet 6 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen verstehen wollen.

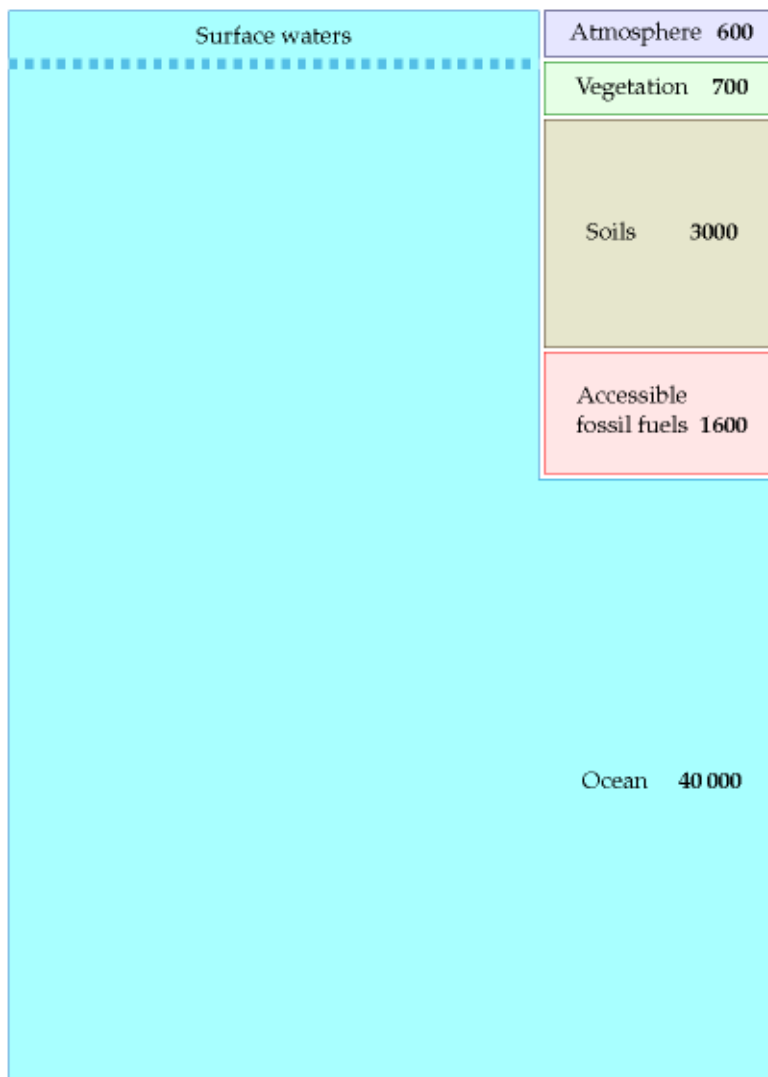


Fig.31.2: Geschätzte Mengen von Kohlenstoff, in Gigatonnen, an zugänglichen Orten der Erde. (Es gibt noch eine ganze Ladung mehr Kohlenstoff im Felsgestein. Dieser Kohlenstoff zirkuliert auf Zeitskalen von Millionen von Jahren, in einem Langzeitgleichgewicht zwischen Kohlenstoff in Sedimenten, die an 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre weiter ansteigen lassen, wie auch den im Oberflächenwasser.

Was ist das langfristige Ziel dieses zusätzlichen CO<sub>2</sub>? 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 ist angetrieben von einer Kombination aus Temperaturgradienten und Salzgehalts-

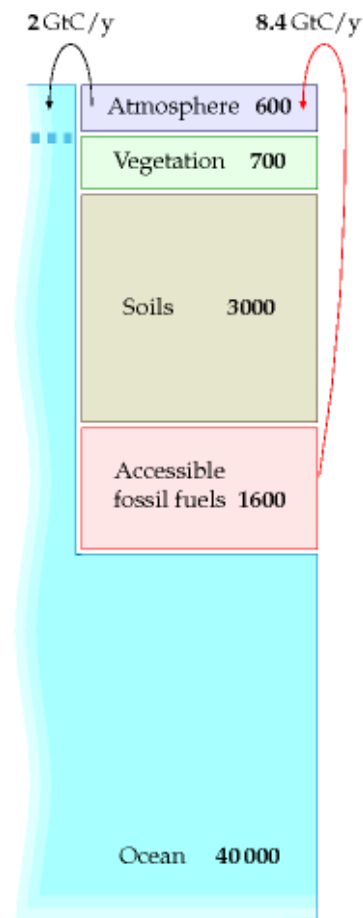


Fig.31.3: Die Pfeile zeigen zwei zusätzliche Kohlenstoffströme, die durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe erzeugt werden. Es ist ein Ungleichgewicht zwischen den 8,4 Gt C/y, das durch fossile Verbrennung in die Atmosphäre gelangt und den 2 Gt C/y, das von den Ozeanen aufgenommen wird. Diese Skizze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

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 Möglichkeit zu verstärkender Rückkopplung, um die man sich sorgt, involviert

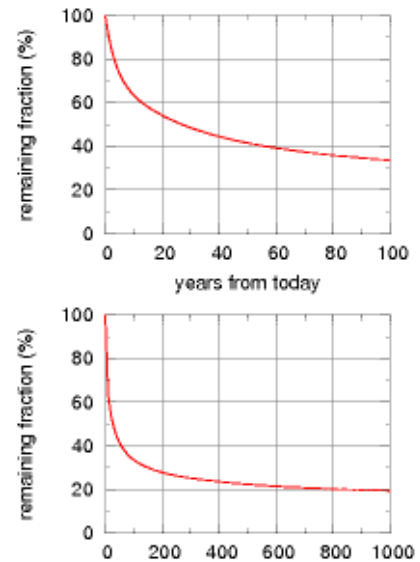


Fig.31.4: Abfall eines schmalen Pulses von CO<sub>2</sub>, das in die heutige Atmosphäre emittiert wird, nach dem Bern Modell des Kohlenstoffzyklus. Quelle Hansen et al. (2007).

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 CO<sub>2</sub>.

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 Saugens

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 CO<sub>2</sub> Energie. Die Gesetze der Physik sagen, dass die benötigte Energie mindestens 0,2 kWh pro kg CO<sub>2</sub> beträgt (Tabelle 31.5). Bedenkt man, dass reale Prozesse typischerweise bestenfalls 35 % effizient sind, würde es mich wundern, wenn die Energiekosten für CO<sub>2</sub>-Einfang je unter 0,55 kWh pro kg gesenkt werden könnten.

Lassen Sie uns nun annehmen, wir wollten den CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>-Einfang mindestens 0,2 kWh pro kg CO<sub>2</sub> erforderlich macht.

Was ist jetzt die beste Methode, um CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> üblicherweise so um:

0,03% CO<sub>2</sub>      konzentrieren      →      reines CO<sub>2</sub>      komprimieren      →      flüssiges CO<sub>2</sub>



Zuerst konzentriert man das CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> aus der Luft



Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO<sub>2</sub>-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient: die Energiekosten lagen bei 3,3 kWh pro kg, die finanziellen Kosten bei 140 \$ pro Tonne CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Schrubber (jeder so groß wie ein großer Überseecontainer) das CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> absorbiert und CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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-Einfangsysteme: Sie saugen CO<sub>2</sub> aus der Luft, und sie verletzen keine physikalischen Gesetze. Sie sind zwei-in-einer Maschinen: Sie sind CO<sub>2</sub>-Einfanganlagen angetrieben durch eingebaute Solarkraftwerke. Sie fangen CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr. Um den europäischen Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 11 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr auszugleichen benötigt man pro Person eine Fläche von 7.500 m<sup>2</sup>. Dies ist doppelt so viel wie die pro-Kopf-Fläche in England. 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 m<sup>3</sup> würde das Holz einer Person 15 m<sup>3</sup> pro Jahr belegen. Das Holz einer Lebensspanne – das, erinnern Sie sich, sicher endgelagert werden muss und nicht verbrannt werden darf – würde 1000 m<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub>-Einfangs zu vermeiden? Hier ist eine interessante Idee: Man zermahle Gestein, das CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>**. 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>-Einfang ist, dass alle eine Menge Arbeit bedeuten, die keiner leisten mag – so lange nicht ein internationales Abkommen für diesen Einfang bezahlt. Momentan sind die CO<sub>2</sub>-Preise zu niedrig.

Eine letzte Idee zum CO<sub>2</sub>-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 km<sup>2</sup> Ozean so düngen kann, dass er 5 Mt CO<sub>2</sub>/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. Englische Kohlenstoffemissionen liegen bei 600 Mt CO<sub>2</sub>/y. Ihre vollständige Neutralisierung würde demnach 120 der o.g. Areale erfordern. Die Karte in Fig.31.6 zeigt diese 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.

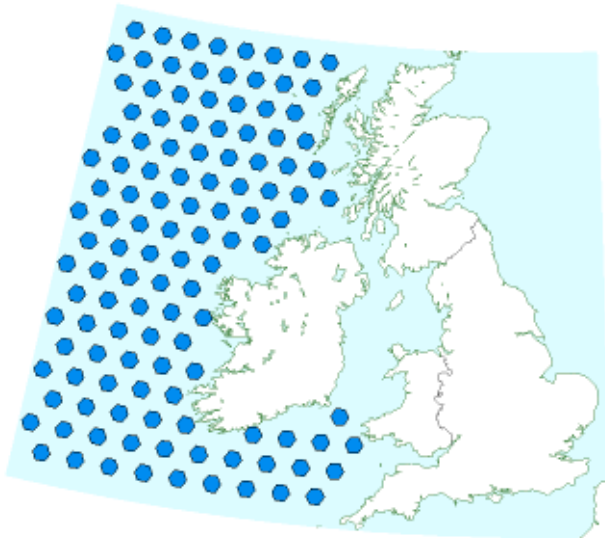


Fig.31.6: 120 Areale im Atlantik, jedes 900 km<sup>2</sup>. Sie bilden die schätzungsweise erforderliche Fläche zur Neutralisierung der britischen Emissionen durch Ozeandüngung

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.

*Commentators can be predicted to oppose manipulations of the ocean, focusing on the uncertainties rather than on the potential benefits. They will be playing to the public's fear of the unknown. People are ready to passively accept an escalation of an established practice (e.g., dumping CO<sub>2</sub> in the atmosphere) while being wary of innovations that might improve their future well being. They have an uneven aversion to risk.*

Ian Jones

*We, humanity, cannot release to the atmosphere all, or even most, fossil fuel CO<sub>2</sub>. To do so would guarantee dramatic climate change, yielding a different planet. . .*

J. Hansen et al (2007)

*"Avoiding dangerous climate change" is impossible – dangerous climate change is already here. The question is, can we avoid catastrophic climate change?*

David King, UK Chief Scientist, 2007



## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 259 In einigen Kreisen war „Gibt es den Klimawandel?“ eine kontrovers diskutierte Frage. 240 *climate change... was a controversial question.* Indeed there still is a “yawning gap between mainstream opinion on climate change among the educated elites of Europe and America” [voxbz].
- 
- 259 Wo ist der ganze Kohlenstoff? 241 *Where is the carbon?* Sources: Schellnhuber et al. (2006), Davidson and Janssens (2006).
- 260 Die Rate des fossilen Brennstoffabbrands 242 *The rate of fossil fuel burning...* Source: Marland et al. (2007).
- 260 Neuere Forschungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Kohlenstoff-Aufnahme der Ozeane rückläufig sein könnte – *Recent research indicates carbon-uptake by the oceans may be reducing.* [www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece](http://www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece), [www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188](http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188), [yofchc], Le Quéré et al. (2007).
- 260 Weil etwa die Hälfte der Kohlenstoff-Emission in der Atmosphäre verbleibt – *roughly half of the carbon emissions are staying in the atmosphere.* It takes 2.1 billion tons of carbon in the atmosphere (7.5 Gt CO<sub>2</sub>) to raise the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration by one part per million (1 ppm). If all the CO<sub>2</sub> we pumped into the atmosphere stayed there, the concentration would be rising by more than 3 ppm per year – but it is actually rising at only 1.5 ppm per year.
- 260 Radioaktiver Kohlenstoff ... hat die Ozeane erst bis zu einer Tiefe von 400 m durchdrungen – *Radioactive carbon... has penetrated to a depth of only about 400 m.* The mean value of the penetration depth of bomb <sup>14</sup>C for all observational sites during the late 1970s is 390±39 m (Broecker et al., 1995). From [3e28ed].
- 262 Erwärmung über 1 °C könnte Methanhydrat schmelzen 244 *Global warming greater than 1 °C would possibly melt methane hydrates.* Source: Hansen et al. (2007, p1942).
- 263 Tabelle 31.5 245 *Table 31.5. Inescapable cost of concentrating and compressing CO<sub>2</sub> from thin air.* The unavoidable energy requirement to concentrate CO<sub>2</sub> from 0.03% to 100% at atmospheric pressure is  $kT \ln 100/0.03$  per molecule, which is 0.13 kWh per kg. The ideal energy cost of compression of CO<sub>2</sub> to 110 bar (a pressure mentioned for geological storage) is 0.067 kWh/kg. So the total ideal cost of CO<sub>2</sub> capture and compression is 0.2 kWh/kg. According to the IPCC special report on carbon capture and storage, the practical cost of the second step, compression of CO<sub>2</sub> to 110 bar, is 0.11 kWh per kg. (0.4 GJ per t CO<sub>2</sub>; 18 kJ per mole CO<sub>2</sub>; 7 kT per molecule.)
- 263 das man dann in einem Erdloch oder in den Tiefen des Ozeans vergraben kann 245 *Shoving the CO<sub>2</sub> down a hole in the ground or deep in the ocean.* Vgl. Williams (2000). “Damit ein großer Anteil des injizierten CO<sub>2</sub> im Ozean verbleibt, muss die Injektion in großer Tiefe erfolgen. Es herrscht Konsens in der Entwicklung, dass die beste kurzfristige Strategie Injektionstiefen für das CO<sub>2</sub> von 1000–1500 anstrebt, was mit bereits bestehender Technologie durchgeführt werden kann.” Siehe auch den IPCC-Bericht: [www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm](http://www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm).

- 263 **Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO<sub>2</sub>-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient** –*In 2005, the best methods for carbon capture were quite inefficient: the energy cost was about 3.3 kWh per kg, with a financial cost of about \$140 per ton of CO<sub>2</sub>.* Quellen: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David and Herzog (2000).
- 263 **Klimatologe Wallace Broecker** –*Wallace Broecker, climate scientist. . .* [www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enbro.html](http://www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enbro.html). His book promoting artificial trees: Broecker and Kunzig (2008).
- 264 **Die besten Pflanzen in Europa binden etwa 10 Tonnen trockenes Holz pro Hektar pro Jahr** 246*The best plants in Europe capture carbon at a rate of roughly 10 tons of dry wood per hectare per year.* Source: Select Committee on Science and Technology.
- 264 **Verstärkte Verwitterung von Felsen** –*Enhanced weathering of rocks.* See Schuiling and Krijgsman (2006).
- 264 **Ozeandüngung** 247*Ocean nourishment.* See Judd et al. (2008). See also Chisholm et al. (2001). The risks of ocean nourishment are discussed in Jones (2008).