

10 Recherche Klimafaktor Natur + Anhang

Schon vor 50 Jahren schrieben der Ozeanograph und Klimatologe Roger Revelle und der Physiker Hans Eduard Suess: Wir führen ein großes geochemisches Experiment durch, einzigartig in der menschlichen Geschichte und unwiederholbar auf der Erde. Wir geben der Atmosphäre und den Ozeanen in wenigen Jahrhunderten all den organischen Kohlenstoff zurück, den die Natur über hunderte Millionen Jahre hinweg in den sedimentierten Gesteinen gespeichert hat (Revelle, Suess 1957).

Zwischen 1850 und 2000 hat die Kohlenstoffmenge in der Atmosphäre bereits um 30 % zugenommen, wobei die größte Zunahme in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erfolgte. Das meiste davon stammt aus der Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle, aber etwa 150 – 160 Gt C (Gigatonnen = Petagramm) entwichen aus terrestrischen Ökosystemen als Ergebnis verschiedener Formen der menschlichen Landnutzung, beispielsweise durch Rodung von Wäldern und Ausweitung der landwirtschaftlichen Produktion. Auch dieser Kohlenstoff wird nur zum Teil in anderen Ökosystemen wieder gebunden (Houghton 2005). Die Triebkräfte dieser Entwicklung sind im Großen und Ganzen bekannt, die Auswirkungen sind jedoch schwer zu überschauen. Die bis heute weltweit ergriffenen Gegenmaßnahmen reichen nachweislich nicht aus, um den Prozess aufzuhalten (IPCC 2007). Da das Klimasystem jedoch nur langsam auf Veränderungen reagiert und es entsprechend lange dauern wird, bis zusätzliche Maßnahmen greifen, dürfen wir damit nicht warten, bis die erwarteten schweren Schäden auftreten (IPCC 2001).

2005 wies der InterAcademyCouncil – ein Zusammenschluss von Vertretern der nationalen Akademien der Wissenschaften aus allen Weltregionen - in einer Verlautbarung auf die drohenden Gefahren der Klimaerwärmung hin: „Es wird immer Unsicherheiten geben bei dem Versuch, ein so komplexes System zu verstehen, wie es das Weltklima darstellt. Aber es gibt nun deutliche Anzeichen dafür, dass eine signifikante globale Erwärmung stattfindet. Direkte Messungen der steigenden oberflächennahen Temperaturen über Land und im Meer, sowie Phänomene wie der weltweite Anstieg des durchschnittlichen Meeresspiegels, abschmelzende Gletscher und Veränderungen in physikalischen und biologischen Systemen lassen dies erkennen. (...) Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre ist von 280 ppm im Jahr 1750 auf über 375 ppm heute gestiegen – er liegt damit über allen Werten der Vergangenheit, soweit man diese zuverlässig zurückverfolgen kann (d.h. für die letzten 420.000 Jahre).“ (Akademien der Wissenschaften 2005). Zwei Jahre später wiederholte der Council die Warnung: „Im Jahr 2007 hat der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) erneut bestätigt, dass der Klimawandel bereits stattfindet und die von Menschen verursachte Erwärmung zahlreiche physikalische und biologische Systeme beeinflusst. Die globalen Durchschnittstemperaturen haben sich zwischen 1906 und 2005 um 0,74°C erhöht. Ein weiterer Anstieg um 0,2°C bis 0,4°C wird für die nächsten 20 Jahre erwartet. Damit sind weitere Folgen unausweichlich, so zum Beispiel durch den Verlust der polaren Eismassen und den Anstieg des Meeresspiegels.“ (Akademien der Wissenschaften 2007, siehe auch zum naturwissenschaftlichen Hintergrund im Anhang).

Die ökonomischen Folgen des Klimawandels

Der 2006 veröffentlichte Bericht des ehemaligen Weltbank-Chefökonomens Nicholas Stern zu den wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels stellt eindeutig fest: „Der Klimawandel bedeutet eine einzigartige Herausforderung für die Volkswirtschaft: er ist das grösste und weitreichendste Versagen des Marktes, das es je gegeben hat.“ (Stern 2006)

Die von Stern zusammengefassten Ergebnisse benennen eine Vielzahl wirtschaftlich relevanter Auswirkungen, die je nach Ausmaß der globalen Erwärmung und der damit verbundenen Veränderungen der Niederschlagsmuster und weiterer Klimafaktoren zu erwarten sind:

Bei einer Erwärmung um:	...ist mit folgenden Konsequenzen zu rechnen:
bis 2° C	In manchen Regionen sind 20-30 % weniger Niederschlagswasser verfügbar (Mittelmeerraum, Südliches Afrika), schwere Folgen für die Sahel-Zone; deutlich sinkende Erntemengen in den Tropen, aber möglicherweise zunächst leicht steigende Ernteerträge in entwickelten Ländern der höheren Breiten, falls der Effekt der Kohlenstoffdüngung stark ausfällt; Schäden an Straßen und Infrastrukturen im Permafrostgebiet (Russland, Kanada); kleine Berggletscher verschwinden weltweit, was beispielsweise in Südamerika die Wasservorräte für 50 Mio Menschen bedroht; 80% der Korallenriff-Ökosysteme werden stark und schließlich irreversibel geschädigt; etwa 15-40 % aller Landlebewesen sind durch den Klimawandel zusätzlich vom Aussterben bedroht; 40-60 Millionen Menschen in Afrika zusätzlich von Malaria bedroht; 300.000 zusätzliche Tote pro Jahr durch Krankheiten, die mit dem Klimawandel im Zusammenhang stehen; beginnende Veränderung der atlantischen thermohalinen Zirkulation (diese ist ein System von Meeresströmungen, die durch Unterschiede in Temperatur und Salzgehalt des Wassers angetrieben werden und einen wesentlichen Einfluss auf das regionale Klima haben)
2-3° C	Eine steigende Zahl Menschen ist von Hunger bedroht, pro Jahr 1-3 Mio zusätzliche Todesopfer durch Mangelernährung; regelmäßige Dürreperioden in Südeuropa und weiteren Regionen; weltweit, aber vor allem in Afrika, ist die Wasserversorgung von mehr als 1 Mrd. Menschen in Gefahr, während gleichzeitig mehr als 1 Mrd. Menschen im Süden und Osten Asiens mit zunehmenden Niederschlägen und damit verbundenen Überschwemmungsrisiken rechnen müssen; möglicherweise vollständiges oder teilweises Kollabieren des Amazonas-Regenwalds; steigende Intensität von Stürmen, Waldbränden, Überflutungen und Hitzewellen; der Eisschild in Grönland beginnt irreversibel zu schmelzen; bis zu 170 Millionen Menschen mehr als heute sind jährlich durch Überflutungen an den Meeresküsten betroffen;
3-4° C	Sinkende Ernteerträge in vielen Weltregionen, in einigen Regionen (unter anderem Teilen Australiens) ist keine Landwirtschaft mehr möglich; 30-50% weniger Niederschlagswasser in der Mittelmeerregion und im südlichen Afrika verfügbar; in Afrika sind im Vergleich zu heute bis zu 80 Mio. Menschen

	mehr von Malaria bedroht; bis zu 300 Millionen Menschen mehr pro Jahr von Überflutungen an den Küsten betroffen,
4-5° C	Viele Regionen erfahren starken Rückgang der Ernteerträge (z.B. bis zu 1/3 in Afrika), große Himalaja-Gletscher sind vom Abschmelzen bedroht, was auch die Trinkwasserversorgung von mehreren hundert Millionen Menschen in Indien und einem Viertel der Bevölkerung Chinas gefährdet, der Anstieg des Meeresspiegels bedroht große Städte wie London, Shanghai, New York, Tokyo und Hong Kong, die Versauerung der Weltmeere kann gravierende Auswirkungen auf die Fischbestände haben; es herrscht ein erhöhtes Risiko von abrupten, großen Veränderungen des Klimasystems (z.B. durch ein Abreißen des Golfstroms oder das Abschmelzen des west-antarktischen Eisschildes)

Bis 2050 könnten allein die Kosten von extremen Wetterereignissen 0,5 – 1% des globalen Brutto sozialprodukts erreichen. Eine Zunahme der Orkanwindgeschwindigkeiten von 5 - 10 % wird die jährlichen Schadenskosten in den USA etwa verdoppeln und Überflutungen könnten dort allein beim Getreideanbau schon in wenigen Jahrzehnten einen jährlichen Schaden in Höhe von 3 Mrd US\$ anrichten. Hitzewellen wie 2003 in Europa mit 35.000 Toten und landwirtschaftlichen Verlusten von umgerechnet 15 Milliarden Dollar werden bis Mitte des Jahrhunderts zur Tagesordnung gehören (Stern 2006).

Allerdings trifft der Klimawandel nicht alle Regionen der Welt gleich. Während die industrialisierten Länder des Nordens in manchen Bereichen zuerst sogar profitieren können (etwa dadurch, dass die Nordostpassage vom Weißen Meer zur Beringstraße für Schiffe häufiger befahrbar und der Zugang zu den Bodenschätzen am Nordpol erleichtert wird), werden die heute schon benachteiligten Regionen besonders hart getroffen. Auf den Malediven kündigte der 2008 neu gewählte Präsident Anni Nasheed an, dass er für seine 300.000 Bürgerinnen und Bürger in Australien oder Indien eine neue Heimat kaufen wolle (150 cm bis zum Untergang, taz vom 26. März 2009). Bis Mitte des Jahrhunderts werden vermutlich 200 Millionen Menschen aufgrund von steigendem Meeresspiegel, Überflutungen und Dürren auf Dauer aus ihrer Heimat vertrieben werden, und bis zum Jahr 2100 könnten nach Stern allein im südlichen Asien und der Subsahara-Zone etwa 145 - 220 Millionen Menschen zusätzlich unter die Armutsgrenze von 2 US\$ pro Tag rutschen; jährlich könnten 165.000 – 250.000 Kinder an den Folgen des Klimawandels sterben. Schmelzen die Eismassen auf dem Festland der polaren Breiten (Grönland, Antarktis), so sind durch den Meeresspiegelanstieg 4 Mio km² Land bedroht, auf denen derzeit 5% der Erdbevölkerung leben (Stern 2006).

Es gibt darüber hinaus auch eine ganze Reihe vermuteter bzw. befürchteter Auswirkungen des Klimawandels, zu denen die Wissenschaft bisher noch keine detaillierten Aussagen machen kann, weil es sich um Veränderungen komplexer ökosystemarer Zusammenhänge handelt: So wird eine ernsthafte Schädigung vieler blütenbesuchender Tierarten befürchtet, mit gravierenden Folgen für die Pflanzen, die sie bestäuben. Auch eine Begünstigung der Ausbreitung gefährlicher Viruserkrankungen wird für möglich gehalten, wie man sie bereits jetzt zum Beispiel an der sogenannten 'Blauzungkrankheit', einer für Rinder, Schafe und Ziegen gefährlichen Tierseuche,

beobachten kann (Stern 2006).

In der Bundesrepublik Deutschland werden nach einer Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung bis zum Jahr 2050 insbesondere folgende unmittelbar wirtschaftlich relevanten Auswirkungen des Klimawandels befürchtet (Kemfert 2008):

Sektor	Mögliche Auswirkungen	Besonders betroffene Bundesländer
Energie	Reduzierte Nachfrage nach Wärme im Winter	BB, BE, HB, HH, MV, NI, NW, SH, SN, ST
	Gesteigerte Nachfrage nach Kühlung im Sommer	BB, BE, HB, HH, MV, NI, NW, SH, SN, ST
	Durch Wasserknappheit bedingtes unzureichendes Kühlwasser für konventionelle Kraft- und Atomkraftwerke	BB, BE, BW, BY, MV, SN, ST, TH
Gesundheit	Anstieg von Krankheiten (Malaria)	Alle
	Zunahme hitzebedingter Krankheiten (Todesfälle)	BB, BE, HB, HH, MV, NI, NW, SH, SN, ST
	Abnahme der Arbeitsproduktivität bei extremer Hitze	BB, BE, HB, HH, MV, NI, NW, SH, SN, ST
Tourismus	Rückgang von Tourismus in Skigebieten	BW, BY, HE, SN, ST, TH
	Anstieg von Tourismus in nördlichen Breiten	HB, HH, MV, NI, SH
Land-/ Forstwirtschaft	Anstieg von Ernteverlusten	BB, BW, BY, MV, SN, ST, TH
	Anstieg von Waldbränden	BB, BE, BW, BY, MV, SN, ST, TH
	Veränderte Anbaumethoden	Alle
	Zunahme von Wassermangel	BB, BE, BW, BY, MV, SN, ST, TH
	Zunahme von Schädlingen	BB, BE, BW, BY, MV, SN, ST, TH
Baugewerbe	Schäden an Immobilien durch Überflutungen	BW, BY, HB, HE, HH, NW, RP, SL, TH
Verkehrssektor	Zunahme an Infrastrukturschäden durch Überflutungen	BW, BY, HB, HE, HH, NW, RP, SL, TH

BB = Brandenburg, BE = Berlin, BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, HB = Bremen, HE = Hessen, HH = Hamburg, MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein, SL = Saarland, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt, TH = Thüringen.

Die Bedeutung von Ökosystemen für Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel

Um die schlimmsten Folgen des Klimawandels zu verhindern, ist eine zweigleisige Strategie nötig: Zum einen muss der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre so schnell wie möglich gebremst werden. Zum anderen sind gleichzeitig bereits jetzt Maßnahmen zur Anpassung

an die Folgen des Klimawandels erforderlich, da ein bestimmtes Maß an Klimaveränderungen selbst bei entschlossenem Handeln aller Akteure nicht mehr zu verhindern ist. Für beide Aufgabenbereiche sind die Leistungen von Ökosystemen von großem potenziellem Wert.

So müssen Maßnahmen zur Verringerung der negativen Folgen des Klimawandels für den Menschen den Schutz der Natur von Anfang an mit einbeziehen. Denn: „Gesunde Ökosysteme sind gegenüber dem Klimawandel unempfindlicher und daher besser in der Lage, die Ökosystemdienstleistungen aufrechtzuerhalten, von denen unser Wohlstand und Wohlergehen abhängen. Sie sind der Kernpunkt jeder Anpassungspolitik. Deshalb müssen die Belastungen, die für die Fragmentierung, die Verschlechterung, die übermäßige Nutzung und die Verschmutzung von Ökosystemen verantwortlich sind, reduziert werden.“ (Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2007)

Das Spektrum der Leistungen der Natur, die bei der gesellschaftlichen Anpassung an den Klimawandel helfen können, ist breit und reicht von der ausgleichenden Wirkung von Grünflächen auf das Stadtklima über die Wasserspeicherung in Mooren und Wäldern bis zur genetischen Vielfalt von Baumarten, die zur Stabilität von Wäldern unter sich ändernden Umweltbedingungen beiträgt. Oft sind Anpassungsstrategien, die das Potenzial von Ökosystemen für die Milderung von Problemen nutzen, sogar kostengünstiger und weniger fehleranfällig als Ansätze, die nur auf technische Lösungen setzen. (Campbell et al. 2008)

Die Rolle von Ökosystemen bei der Vorsorge gegen Naturkatastrophen, die im Zuge des Klimawandels zunehmen könnten, wird in einem separaten Abschnitt noch eingehender behandelt.

Der ökonomische Wert der Kohlenstoffbindung in Ökosystemen

Über die Photosynthese werden jährlich weltweit ungefähr 120 Gigatonnen Kohlenstoff von Pflanzen aufgenommen. Legt man ein stark vereinfachtes Modell zugrunde, würden davon ohne weiteres Eingreifen des Menschen etwa 60 Gigatonnen von den Pflanzen selbst wieder durch ihre Atmung freigesetzt, etwa 60 Gigatonnen würden von den anderen Lebewesen aufgenommen und wieder abgegeben. Damit bestünde ein ungefähres Gleichgewicht zwischen Photosynthese und Atmung. Dieses Gleichgewicht kann aber nur so lange bestehen, wie sich Aufbau und Abbau von Pflanzenmaterial die Waage halten. Verschiebungen in die eine oder andere Richtung – etwa aufgrund von Änderungen in Vegetationsdecke und Böden durch Landnutzungsänderungen – bewirken eine Festlegung oder Freisetzung von Kohlenstoffverbindungen. (Grace 2004)

Weltweit verursachen die Vernichtung und Degradation von Wäldern, die Trockenlegung von Feuchtgebieten und nicht nachhaltige landwirtschaftliche Nutzungsformen etwa 20 Prozent der globalen anthropogenen CO₂-Emissionen. Die Schädigung von Ökosystemen setzt damit mehr CO₂ frei als der weltweite Verkehr (IPCC 1996, Baumert et al. 2005, IPCC 2007, Kaiser, Krug 2008).

An drei Beispielen, den Wäldern, den Mooren und Sümpfen und dem Ozean, soll die Bedeutung von Ökosystemen für den globalen Kohlenstoffhaushalt im Folgenden näher betrachtet werden.

Um den ökonomischen Wert der Aufnahme und Freisetzung von CO₂ zu berechnen, sind verschiedene Ansätze möglich.

Eine Möglichkeit ist die Berechnung der „gesellschaftlichen Kosten des Kohlenstoffs“. Damit sind die Kosten gemeint, die durch die Folgeschäden des Ausstoßes einer bestimmten Menge an Treibhausgasen zu einem bestimmten Zeitpunkt verursacht werden (Clarkson, Deyes 2002, IPCC 2007). Nicht in Geld bemessbare Schäden, etwa der Verlust von Menschenleben, bleiben dabei unberücksichtigt. Da die Folgen des Klimawandels in Zukunft zunehmen werden, steigen nach dieser Bewertungsmethode auch die Kosten des Kohlenstoffs von Jahr zu Jahr. Dem Bericht des IPCC von 2007 zufolge wurden die gesellschaftlichen Kosten für eine im Jahr 2005 ausgestoßene Tonne Kohlendioxid von verschiedenen Expertenteams auf durchschnittlich 12 US-Dollar geschätzt. Die zukünftige Zunahme der Kosten wurde auf 2,4 % pro Jahr geschätzt. Die mit dieser Methode errechneten Werte sind allerdings stark von den gewählten Eingangsdaten abhängig. Auch die Wahl des sogenannten Diskontierungs- oder Abzinsungsfaktors spielt dabei eine Rolle. Der Diskontierungsfaktor bewirkt, dass in der Zukunft liegende Schäden bei einer wirtschaftlichen Betrachtung geringer bewertet werden als ein heute eintretender Schaden in gleicher Höhe. Viele Experten halten es für unangemessen, bei einer gesamtgesellschaftlichen Betrachtung von Zukunftsoptionen eine ähnlich hohe Abzinsung zu Grunde zu legen wie beim wirtschaftlichen Kalkül eines einzelnen Unternehmens (Portney & Weyant 1999, Stern 2006, IPCC 2007). Manche Studien schätzen die aktuellen gesellschaftlichen Kosten einer Tonne Kohlendioxid daher sogar auf mehrere hundert Dollar (IPCC 2007).

Eine grundsätzlich andere, sehr praxisorientierte Methode ist die Bestimmung des Kohlenstoffpreises auf der Grundlage des Marktgeschehens in bestehenden Emissionshandelssystemen. Durch die Verpflichtung zum Erwerb von Emissionszertifikaten kann Verursachern ihr Anteil am CO₂-Ausstoß in Rechnung gestellt werden. Auf diese Weise werden sie dazu angehalten, diesen zu minimieren. Der Preis der Emissionszertifikate hängt von den politischen Rahmenbedingungen ab (die wiederum z.B. durch die Reduktionsverpflichtungen der am Emissionshandel beteiligten Staaten beeinflusst werden), aber auch von der aktuellen Wirtschaftslage. Er unterliegt daher starken Schwankungen. Es ist zu erwarten, dass im Zuge einer Intensivierung der Klimaschutzbemühungen zukünftig auch die Preise für Emissionszertifikate deutlich steigen werden (IEA 2009, KfW / ZEW CO₂ Panel 2009).

Zur Verdeutlichung des Beitrags, den die Natur zur Reduktion des CO₂-Gehalts der Luft leistet, wurde in den folgenden Berechnungsbeispielen aus Gründen der Anschaulichkeit der Marktpreis für Emissionszertifikate im Emissionshandelssystem der EU verwendet, sofern nicht bereits eine andere Bezugsgröße durch die Autoren der entsprechenden Studien vorgegeben war. Dieser lag am 9. April 2009 bei 12,88 Euro je Tonne CO₂ (European Energy Exchange, Emission Rights Spot nach EEX Carbon Index 'carbix', <http://www.eex.com/en/>). Allerdings bilanzieren die meisten der zitierten naturwissenschaftlichen Studien die Effekte des Auf- und Abbaus von Biomasse in Tonnen Kohlenstoff und nicht in Tonnen CO₂. Um die Tonne Kohlenstoff analog zu den Emissionszertifikaten monetarisieren zu können, wird in den folgenden Ausführungen ein

Umrechnungsfaktor von 3,5 verwendet (eine Tonne Kohlendioxid (CO₂) enthält 272,73 kg Kohlenstoff (C), d.h. eine Tonne Kohlenstoff entspricht 3,67 Tonnen CO₂, s. auch <http://www.climatepartner.de/hintergrund/klimaschutz/was-ist-1-tonne-co2/>). Zum Problem der Umweltschutzfinanzierungen durch Emissionshandel vgl. Loft 2007..

Wald schützt Klima

Wälder bedecken mit ca. 39 Millionen Quadratkilometern etwa ein Viertel der Landfläche der Erde (CBD 2001). Knapp die Hälfte des in terrestrischen Ökosystemen gebundenen Kohlenstoffs befindet sich in Wäldern (WBGU 1998). Naturwälder enthalten dabei auf gleicher Fläche in der Regel deutlich mehr Kohlenstoff als vergleichbare Wirtschaftswälder, denn die ungestörten Lebensvorgänge im Boden begünstigen den Aufbau von Biomasse und die Humusbildung, und auch die oberirdische Biomasse ist meist höher, da mehrschichtige und teilweise sehr artenreiche Pflanzengemeinschaften den Baumbestand ergänzen (IPCC 2006). Letzteres trifft auf die Tropenwälder in besonderem Maße zu. Zudem haben natürliche Wälder einen hohen Anteil an Totholz, das mehr als zehn Prozent ihres gesamten Kohlenstoffvorrats ausmachen kann. Ungestörte Primärwälder können neueren Untersuchungen zu Folge sowohl in den Tropen als auch in den gemäßigten und borealen Breiten trotz ihres teilweise sehr hohen Alters weiter Kohlenstoff akkumulieren (Luyssaert et al. 2008, Lewis et al. 2008, Phillips et al. 2008).

Eine abnehmende Biodiversität führt auch in von Gräsern gebildeten Pflanzengemeinschaften zu einer abnehmenden Biomasseproduktion und damit einer geringeren CO₂-Bindungsfähigkeit (Tilman et. al. 2006).

Die anhaltende Waldvernichtung in vielen Ländern der Erde verursacht einen großen Teil der anthropogenen Treibhausgasemissionen aus Ökosystemen. Unter der Annahme eines funktionierenden Marktmechanismus und eines extrem niedrigen Preises von nur 10 \$ pro Tonne Kohlenstoff, d.h. ca. 2,7 \$ pro Tonne Kohlendioxid, lassen sich die pro Hektar auftretenden Verluste durch die Kohlenstofffreisetzung bei der Umwandlung von Tropenwald in landwirtschaftlich genutzte Flächen folgendermassen darstellen (CBD 2001):

	Ursprüngl. Situation (C-gehalt und Wert)		Wanderfeldbau (C-gehalt und Wert)		Permanenter Ackerbau (C-gehalt und Wert)		Weidebewirtschaftung (C-gehalt und Wert)	
	tC/ha	US\$/ha	tC/ha	US\$/ha	tC/ha	US\$/ha	tC/ha	US\$/ha
			79 (53 Boden, 25 Biomasse)	790	63 (überwiegend Boden)	630	63 (überwiegend Boden)	630
Primärer Wald	283 (116 Boden, 167 Biomasse)	2830	-204	-2.040	-220	-2.200	-220	-2.200
Sekundärer Wald	194 (84 Boden, 110 Biomasse)	1940	-106	- 1.060	-152	-1.520	-122	- 1.220
Offener Wald	115	1150	-36	- 360	-52	- 520	-52	- 520

Aufgrund der besonders hohen Kohlenstoffgehalte in Wäldern, die über längere Zeiträume ungenutzt geblieben sind, sollten sich Schutzbemühungen auf internationaler Ebene insbesondere auf die letzten verbliebenen großen Urwaldregionen, in Mitteleuropa dagegen auf ausgewählte naturnahe Waldgebiete konzentrieren. Das große Potenzial von Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation in Entwicklungsländern ist bei den Verhandlungen zu einer Weiterentwicklung des internationalen Klimaregimes in den letzten Jahren immer mehr zu einem wichtigen Diskussionsthema geworden (vgl. Parker et al. 2009).

Aber auch bewirtschaftete Wälder können einen beachtlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten, denn das bei der Ernte entnommene Holz kann je nach der weiteren Verwendung auf verschiedene Weise helfen, Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Bei einer Verarbeitung zu langlebigen Produkten, beispielsweise als Möbel- oder Bauholz, bleibt ein großer Teil des durch die Photosynthese gebundenen Kohlenstoffs weiter gespeichert, zumindest bis die Produkte – oft erst nach vielen Jahren - entsorgt werden. Gleichzeitig können dabei durch das Holz andere, mit hohem Energieaufwand und entsprechenden CO₂-Emissionen herzustellende Materialien ersetzt werden. Der Energieverbrauch bei der Verwendung von Holz als Baustoff steht im Vergleich zu Zement, Stahl oder Aluminium je nach Anwendung etwa im Verhältnis 1 : 4 : 24 : 126. Auch durch die Nutzung von Holz als Energieträger können im Vergleich zum Einsatz fossiler Brennstoffe Treibhausgasemissionen eingespart werden. So ersetzt ein Kubikmeter Holz bei der Verbrennung rund 220 Liter Heizöl oder 270 Kubikmeter Erdgas. (Höltermann, Klein 2006)

Um das Potenzial des Walds für den Klimaschutz optimal zu nutzen, empfiehlt sich deshalb eine ganzheitliche Strategie, die neben dem Schutz von Naturwäldern auch eine nachhaltige, ressourcen- und klimaschonende Bewirtschaftung von Wäldern und einen sparsamen und effizienten Umgang mit den erzeugten Produkten umfasst. Neben der Verwendung als Energieträger sollte Holz insbesondere dort eingesetzt werden, wo es andere, energieaufwändigere Materialien ersetzen kann.

Die europäischen Wälder sind derzeit Kohlenstoffsenken, da das Wachstum stärker ist als die jährliche Entnahme. Die Produktivität der Wälder ist unter anderem wegen des zunehmenden CO₂-Gehalts der Atmosphäre, der längeren Vegetationsperiode wegen der Erderwärmung und der hohen Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft hoch. Eine Rolle spielt auch, dass die Wälder durchschnittlich relativ jung und daher in einer Aufbauphase sind (Janssen et al. 2005).

Der österreichische Wald war beispielsweise in der Rechenperiode von 1990–2002 eine Senke für 19 % der österreichweiten Treibhausgasemissionen (Umweltbundesamt 2006b).

In Baden-Württemberg wurde die klimawirksame Leistung des Gesamtwaldes in einer Studie auf etwa 76 €/ha = 100 Mio. € geschätzt (MLR BW 2000, S.14).

In Deutschland ist mit 11,1 Millionen Hektar etwa ein Drittel der Landfläche bewaldet (BMVEL 2004). Der weitaus überwiegende Teil dieser Fläche wird forstlich bewirtschaftet. Der jährliche durchschnittliche Holzzuwachs lässt sich mit etwa 9 Festmetern pro Hektar angeben. Wenn man den Wert des darin enthaltenen Kohlenstoffs auf der Grundlage des oben genannten Preises von

12,88 Euro pro Tonne CO₂ berechnet (zur Berechnung der CO₂-Menge pro Festmeter vgl. Brandl 2002), so ist die Senkung des CO₂-Gehalts der Luft durch die deutschen Wälder etwa 865 Mio. Euro pro Jahr wert.

In der Schweiz betrug der jährliche Holzzuwachs zwischen 1993 und 2006 nach der Forststatistik 1,51 Mio. m³ (Schaffer 2008). Die durch den Wald bewirkte CO₂-Bindung beträgt etwa 2,5-3 Mio. Tonnen im Jahr, das entspricht 5-6% der Emissionen der Schweiz und bei einem angenommenen Preis von 10 Schweizer Franken pro Tonne CO₂ (ca. 6,50 Euro) einem Gegenwert von 18 Mio. Franken (Meuli 2005).

Neben dem Klimaschutz haben Wälder noch weitere wichtige Funktionen: Wasserschutz, Erholung, Bodenschutz, Beeinflussung des Lokalklimas, Emissions- und Lärmschutz.

Gerade bei Tropenwäldern kann aufgrund der extremen Klimabedingungen mit intensiver Sonneneinstrahlung, hohen Temperaturen und heftigen Regenfällen das Vorhandensein einer geschlossenen Vegetationsdecke wichtig sein. Je geringer die einzelnen, oft isolierten Waldflächen in ansonsten gerodeten und anderen Nutzungen zugeführten Gebieten sind, desto weniger können sie ihre Klimawirkung erhalten und durch Wasserrückhaltung und Verdunstung das Regionalklima beeinflussen. Insbesondere für den Amazonas- Regenwald gibt es dabei nach Modellrechnungen kritische Schwellen (tipping points): Wenn ein gewisser Mindestanteil an Wald unterschritten wird, könnte sich der Entwaldungsprozess erheblich beschleunigen und zum Verlust der restlichen Bestände führen, selbst wenn diese keinen direkten menschlichen Eingriffen ausgesetzt sind. (Vohland, Cramer 2008).

Ein besonderer Fall sind die Mangrovenwälder, die einen großen Teil der tropischen Meeresküsten besiedeln. Da die Bäume im Flachwasser der Gezeitenzone stehen, wird regelmäßig ein Teil des mit dem Laubfall auf den Grund gelangenden Kohlenstoffs von der Flut hinaus aufs offene Meer gespült. Forscher stellten fest, dass der auf diese Weise in die Ozeane gelangte organische Kohlenstoff etwa 26 Millionen Tonnen pro Jahr und damit mehr als ein Zehntel der insgesamt vom Land aus eingetragenen Menge ausmacht – ein weiterer Grund, die anhaltende Vernichtung der Mangrovengürtel mit Sorge zu betrachten. (Dittmar et al. 2006, Duke et al. 2007).

Die Rolle der Moore und Feuchtgebiete für den Klimaschutz

Auch Moore und Feuchtgebiete speichern CO₂, sowohl in den lebenden Pflanzen als auch in den Torfschichten. Weltweit sind das 270-255 Gt C, europaweit bei 51,5 Millionen ha Fläche 42 Gt C, in Deutschland bei 1,3 Millionen ha 0,4 Gt C. (Byrne et al. 2004) Da das Torfwachstum ein sehr langsamer Prozess ist, war der Aufbau dieser Kohlenstoffvorräte nur durch eine über Jahrtausende hinweg anhaltende Entwicklung möglich. Hingegen emittieren die weltweit zerstörten Moore ca. 3 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr (Parish et al. 2008).

Beim Abbau organischer Substanz wird in Mooren in den oberen Schichten, unter Sauerstoffzufuhr, CO₂ gebildet. In den vom Sauerstoff abgeschlossenen Schichten kann unter bestimmten Bedingungen Methan entstehen. Betrachtet man nur die Bilanz zwischen abgelagertem Kohlenstoff und Ausstoß von CO₂, sind intakte Moore Treibhausgasenken, d. h., sie nehmen mehr Kohlenstoff

auf als sie wieder an die Atmosphäre abgeben. Bezieht man die Abgabe von Methan in die Bilanz mit ein, so sind die Moore in der gängigen, auf einen Zeithorizont von 100 Jahren bezogenen Betrachtungsweise bereits heute Treibhausgasproduzenten. Dies liegt daran, dass Methan zwar eine kürzere Verweildauer in der Atmosphäre, aber gleichzeitig eine stärkere Treibhauswirkung als Kohlendioxid hat. Je länger der Betrachtungszeitraum ist, desto positiver stellt sich die Bilanz dar. Bei Abbau des Torfs oder Umwandlung der Moore in landwirtschaftliche Flächen oder Wald verstärkt sich der Beitrag zum Treibhauseffekt dramatisch, da auch die CO₂-Bilanz negativ wird, d. h. die Moore geben mehr CO₂ ab als sie aufnehmen. (DGMT 2009)

Auf Grund von Landnutzung sind in Deutschland ca. 90 % aller Moore entwässert. Durch die damit verbundene Zersetzung des Torfs und den Nutzungseinfluss stellen sie eine starke Quelle für die Treibhausgase CO₂ und N₂O dar. Emissionen aus Moorböden machen derzeit ca. 2,5 – 5 % der Gesamtemissionen Deutschlands aus, das entspricht zwischen 23 und 44 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten Treibhausgase pro Jahr. Nach Berechnungen des vom BMBF geförderten FuE-Vorhabens „Klimaschutz – Moornutzungsstrategien“ könnte eine klimafreundlich durchgeführte Renaturierung der dränierten Moore Deutschlands theoretisch bis zu 35 Mio. t Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr einsparen und gleichzeitig zur Erhaltung der natürlichen biologischen Vielfalt von Moorökosystemen beitragen (Freibauer et al. 2009).

Wie der Wald sind auch die intakten Moore nur bedingt belastbar. Die Zunahme des CO₂-Gehalts der Atmosphäre, Überdüngung mit Stickstoff und stärkere Austrocknung durch die Erderwärmung verändern die CO₂-Bilanzen.

Am Beispiel eines südschwedischen Hochmoors zeigten Forscher, dass die Kohlenstoffaufnahme Ende des 19. Jahrhunderts 27 Gramm pro Quadratmeter und Jahr betrug. Aufgrund von Stickstoffeinträgen und den damit verbundenen Vegetationsveränderungen ist zu erwarten, dass sie zukünftig auf 8 Gramm pro Quadratmeter und Jahr zurückgeht, was in etwa der Freisetzung von Kohlenstoff entspricht. Das Moor stellt demnach keine Senke für Kohlenstoff mehr dar (Byrne et al. 2004).

Allein die tiefgründigen Moore des indonesischen Regenwalds speichern eine Menge Kohlenstoff, die dem Verhandlungsvolumen des Kyoto-Protokolls entspricht. Werden die Moore trockengelegt, entweicht ein Großteil des enthaltenen Kohlenstoffs in die Atmosphäre. Brände, die sowohl die oberirdische Biomasse als auch den Torf selbst entflammen, beschleunigen den Prozess. 1997 setzten Torfbrände in den indonesischen Moorwäldern etwa 2,6 Gt C frei – das entsprach etwa 40 % der globalen Emissionen aus fossilen Brennstoffen in diesem Jahr. Diese Moore zu schützen, sollte daher ein vordringliches Anliegen für den Klimaschutz sein (Vohland, Cramer 2008; Parish et al. 2008).

(noch genauer zu recherchieren – Zahlen)

Eine angepasste Landnutzung unterstützt den Klimaschutz

Mit angepassten Formen der landwirtschaftlichen Nutzung, bei denen Erosion und Humusabbau vorgebeugt wird bzw. die Humusbildung gefördert wird, kann die Klimabilanz der Böden

verbessert werden. Viele hierzu geeignete Landnutzungsoptionen, etwa der ökologische Landbau unterstützen auch die Anpassung an den Klimawandel. Ökologisch bewirtschaftete Böden weisen i. d. R. einen höheren Humusgehalt auf und können somit mehr Kohlenstoff einlagern. Zurückzuführen ist dies auf kohlenstoffanreichernde Bewirtschaftungsmethoden wie

- die Verwendung hoher Kleeanteile (Klee grasbestände) als Bestandteil in der Fruchtfolge,
- der Anbau mehrjähriger Kulturen (Klee gras), der für eine erhöhte Bodenruhe sorgt,
- dem hohen Anteil an Gründüngern (Zwischenfruchtbau) und
- der Ausbringung von wirtschaftseigenen Düngern (meist auf Stroh basis).

Unter Anwendung all dieser Maßnahmen, hat der ökologische Landbau ein Kohlenstoff-Anreicherungspotential von $0,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, d.h. grundsätzlich ist der ökologische Landbau in punkto Humusanreicherung und Klimaschutz positiver als die konventionelle Landwirtschaft einzuschätzen.

Auch die Erhaltung von Grünland dient dem Klimaschutz. Aufgrund einer ausgeprägten Wurzelmasse, dem zusätzlichen Eintrag organischer Substanz durch Gräser sprosse sowie einer geringeren Störung des Bodenregimes, fallen die Bodenkohlenstoffvorräte in Grünlandböden erheblich höher aus als in Ackerböden. Bei Störungen des Bodenregimes wie sie beispielsweise bei Grünlandumbruch auftreten, wird ein bedeutender Anteil des Bodenkohlenstoffes mineralisiert und in Form von CO_2 freigesetzt. Zwischen 20 und 40 % bzw. 20 und 35 Tonnen $\text{C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ des ursprünglichen Bodenkohlenstoffes kann infolge einer solchen Landnutzungsänderung mineralisiert werden. Die Umwandlung von Grünland in Ackerflächen kann somit eine bedeutende Treibhausgas-Quelle sein.

Diese Beispiele machen deutlich: Es gibt zahlreiche Synergien zwischen Klimaschutz und Naturschutz. Naturschutz und die Erhaltung von Ökosystemleistungen sind deshalb eine wichtige Voraussetzung, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen. Viele Naturschutzmaßnahmen sind gleichzeitig praktizierter Klimaschutz. Ein effektiver Klimaschutz braucht daher den Naturschutz.

Die Rolle der Ozeane für den Klimaschutz

Es gibt einen regen Austausch von CO_2 und anderen Gasen zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre. Dieser hängt von Faktoren wie Meeresströmungen, pH-Wert und Temperatur des Wassers ab. Marine Ökosysteme spielen eine wichtige Rolle im Kohlenstoffkreislauf und sind in der Lage, CO_2 auch über längere Zeiträume aus der Atmosphäre zu entziehen und in den Sedimenten und Kalkverbindungen abzulagern. Die weltweite marine Primärproduktion wird auf 52-55 Gt C pro Jahr geschätzt (Smyth et. al. 2005). Die Meere haben bisher durch physikalische und biologische Prozesse rund ein Drittel der anthropogenen CO_2 -Emissionen aufgenommen, das sind jährlich etwa 2 Gigatonnen Kohlenstoff zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Kohlenstoff

(der aktuelle Marktwert beim Emissionszertifikatehandel wären etwa 90 Mrd Euro pro Jahr). Allerdings können temperaturbedingte Veränderungen in der ozeanischen Zirkulation und der vertikalen Durchmischung der Meeresschichten die Produktion von Biomasse stark verändern, als Rückkoppelungseffekt kann es zu einer Verringerung der Kapazität zur Kohlenstoffspeicherung kommen. Ein weiteres Problem ist, dass das CO₂ im Meerwasser gelöst wird und damit zu einer Versauerung des Meerwassers beiträgt. Seit Beginn der Industrialisierung ist der pH-Wert des Oberflächenwassers der Meere im Mittel um etwa 0,11 Einheiten gesunken (Sterr, 2007). Das hat vor allem Auswirkungen auf die Mikroorganismen, die dem Meerwasser zum Aufbau von Kalkskeletten Kohlenstoff entziehen. Die Karbonatkonzentration an der Meeresoberfläche hat bereits um 10% gegenüber der vorindustriellen Zeit abgenommen. Die Meeresorganismen, die Kalkschalen oder Kalkskelette aufbauen, bilden dazu zwei verschiedene Formen von Kalkkristallen aus, das Aragonit und das Kalzit. Das Aragonit ist leichter löslich und kann nur bestehen, wenn eine Karbonatkonzentration von 66 Mikromol pro kg Meerwasser vorhanden ist. Sinkt die Konzentration unter diesen Wert, so löst sich das Aragonit auf. Betroffen sind davon vor allem Korallen, Muscheln, Schnecken und Teile des Planktons. In den tropischen Meeren beträgt heute die Karbonatkonzentration durchschnittlich 240 Mikromol/Kilogramm, in den südlichen Meeren nur 105 Mikromol pro Kilo. Ein gleichmäßiger weiterer Eintrag von CO₂ könnte schon Mitte des Jahrhunderts ein Unterschreiten des notwendigen Karbonatgehaltes bedeuten, was zum Absterben vieler Organismen führen würde. Fast alle Standorte der Warmwasserkorallen wären davon betroffen. (WBGU 2006).

Es ist zu vermuten, dass diverse und intakte Lebensgemeinschaften mit derartigen Veränderungen besser fertig werden können als gestörte und artenarme, da sich die verschiedenen Arten in ihren Funktionen ergänzen. Dramatische Klimaveränderungen haben in der Vergangenheit zu Massenaussterben geführt. Artenreiche Ökosysteme erhöhen die Chance, dass einzelne Spezies überleben und sich an die verändernden Bedingungen anpassen und neue ökologische Nischen besetzen können (National Committee of the Census of Marine Life 2006).

Neben der Temperaturerhöhung und der Übersäuerung gibt es weitere großräumige Prozesse, die mit dem Klimawandel im Zusammenhang stehen: Veränderungen in der Chemie des Meeres durch das Schmelzen der Gletscher und des Polareises und die Auswirkungen auf die Wasserzirkulation, Veränderungen im Staubeintrag usw. Diese werden die Primärproduktion in den Ozeanen ebenfalls beeinflussen (Glikson 2008, siehe auch weitere Hintergrundmaterialien zur Rolle der Ozeane und der marinen Biodiversität im Anhang).

Klimaschutz – Literatur

- Akademien der Wissenschaften (2005): *Joint science academies' statement: Global response to climate change*. Academia Brasileira de Ciências (Brazil), Royal Society of Canada (Canada), Chinese Academy of Sciences (China), Académie des Sciences (France), Deutsche Akademie der Naturforscher (Leopoldina, Germany) Indian National Science Academy (India), Accademia Nazionale dei Lincei (Italy), Science Council of Japan (Japan), Russian Academy of Sciences (Russia), Royal Society (United Kingdom), National Academy of Sciences (United States of America), http://www.leopoldina-halle.de/cms/fileadmin/user_upload/leopoldina_downloads/climate_change.pdf
- Akademien der Wissenschaften (2007): *Joint Science Academies' Statement: Climate Change Adaptation and the Transition to a Low Carbon Society*. Academia Brasileira de Ciências (Brazil), Royal Society of Canada (Canada), Chinese Academy of Sciences (China), Académie des Sciences (France), Deutsche Akademie der Naturforscher (Leopoldina, Germany), Indian National Science Academy (India), Accademia Nazionale dei Lincei (Italy), Science Council of Japan (Japan), Academia Mexicana de Ciencias (Mexico), Russian Academy of Sciences (Russia), Academy of Science of South Africa (South Africa), Royal Society (United Kingdom), National Academy of Sciences (United States of America), http://www.leopoldina-halle.de/cms/fileadmin/user_upload/G8_Statement_Climate.pdf
- Archer D (2004): *Biological Fluxes in the Ocean and Atmospheric CO₂*. In: Elderfield H (ed.): *Treatise on Geochemistry Vol. 6: The Oceans and Marine Geochemistry*. Amsterdam et al.: Elsevier, pp. 275-291
- Baumert K A, Herzog T, Pershing J (2005): *Navigating the numbers – Greenhouse gas data and international climate policy*. World Resources Institute
- Beaumont N J, Austen M C, Mangi S C, Townsend M (2006): *Marine Biodiversity. An Economic Valuation. Building the evidence base for the Marine Bill*. DEFRA, UK
- Behrenfeld M J, Randerson J T, McClain C R, Feldman G C, Los S O, Tucker C J, Falkowski P G, Field C B, Frouin R, Esaias W E, Kolber D D, Pollack N H (2001): *Biospheric primary production during an ENSO transition*. In: *Science*, Vol. 291, pp. 2594-2597
- Biddle J F, Lipp J S, Lever M A, Lloyd K G, Sørensen K B, Anderson R, Fredricks H F, Elvert M, Kelly T J, Schrag D P, Sogin M L, Brenchley J E, Teske A, House C H, Hinrichs K-U (2006): *Heterotrophic Archaea dominate sedimentary subsurface ecosystems off Peru*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America PNAS*, Vol. 103, pp. 3846-3851
- Boetius A, Ravenschlag K, Schubert C, Rickert D, Widdel F, Gieseke A, Amann R, Jørgensen B B, Witte U, Pfannkuche O. (2000) *A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane*. In: *Nature*, Vol. 407, pp. 623-626
- Brandl H (2002): *CO₂-Handel - Eine Option für die deutsche Forstwirtschaft?* in: *Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft*, Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 18, S. 227 - 240.
- Burschel P, Kürsten E, Larson B C (1993): *Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffgehalt - Eine Bearbeitung für die Bundesrepublik Deutschland*. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen

Fakultät der Universität München und der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt
126/1993

- BMVEL (2004): *Die BWI2-Ergebnisse: Der deutsche Wald im Jahr 2002 - Walderhaltung gesichert*. Bundeswaldinventur 2001 – 2002, Auswertung bis 2004, www.bundeswaldinventur.de
- Byrne K A, Chojnicki B, Christensen T R, Drösler M, Freibauer A, et al. (2004). *EU peatlands: Current carbon stocks and trace gas fluxes*. CarboEurope-GHG Concerted Action – Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget, Report 4/2004, Specific Study, Tipo-Lito Recchioni, Viterbo, October 2004, <http://dbs.clib-jena.mpg.de/dbs-publ/pubi/bgc/BGC0859.pdf>
- Campbell A, Kapos V, Chenery A, Kahn, S I, Rashid M, Scharlemann J P W, Dickson B (2008). *The linkages between biodiversity and climate change mitigation*. UNEP World Conservation Monitoring Centre. <http://www.cbd.int/doc/meetings/cc/ahteg-bdcc-02-02/other/ahteg-bdcc-02-02-unep-wcmc-en.doc>
- Canadell J G, Le Quere C, Raupach M R, Field C B, Buitenhuis E T, Ciais P, Conway T J, Gillett N P, Houghton R A, Marland G (2007): *Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks*. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)
- CBD (2001): *The Value of Forest Ecosystems*. CBD Technical Series No. 4. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-04.pdf
- Clarkson R, Deyes K (2002): *Estimating the Social Cost of Carbon Emissions*. Government Economic Service Working Paper 140, DEFRA, London
- DGMT / Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde (2009): *Was haben Moore mit dem Klima zu tun?* http://www.dgmt-ev.de/downloads/DGMT_Flyer_2009_Web.pdf
- Dittmar T, Hertkorn N, Kattner G, Lara R J (2006): *Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans*. Global Biogeochemical Cycles 20, GB1012
- Duke N C, Dittmann S, Ellison A M, Anger K, Berger U, Cannicci S, Diele K, Ewel K C, Field C D, Koedam N, Lee S Y, Marchand C, Nordhaus I, Dahdouh-Guebas F (2007): *A World Without Mangroves?* In: Science, Vol. 317, pp. 41-42
- Freibauer A, Drösler M, Gensior A, Schulze E (2009): *Das Potenzial von Wäldern und Mooren für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene*. Natur und Landschaft 1/2009:20-25
- Gabric A, Gregg W, Najjar R, Erickson D, Matrai P (2001): *Modelling the biogeochemical cycle of dimethylsulfide in the upper ocean: a review*. In: Chemosphere - Global Change Science, Vol. 3, pp. 377-392
- Girod M (2006): *CO₂-Management: Kohlenstofffixierung: Eine Marktlücke für den Wald?* AK Forstliches Ingenieurwesen, 12.1.06. www.lue.ethz.ch/education/Fowi/AK_WS_05_06/co2_doku.pdf
- Glikson A Y (2008): *Milestones in the evolution of the atmosphere with reference to climate change*. In: Australian Journal of Earth Sciences, Vol. 55, pp. 125-139

- Grace J (2004): *Understanding and managing the global carbon cycle*. In: Journal of Ecology, Vol. 92, pp. 189-202
- Heinrichs D, Hergt M (1990): *dtv-Atlas zur Ökologie*. München: dtv
- Henseling K O (2008): *Am Ende des fossilen Zeitalters*. München: Ökom
- Höltermann A, Klein M (2006): *Wald, Naturschutz und Klimawandel*. DNR EU-Rundschreiben Sonderheft 02/03, 12-14
- Houghton R A, Skole D L (1990): *Carbon*. In: Turner B L et al. (eds.): *The Earth as Transformed by Human Actions*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 393-408
- Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (1995): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press
- Houghton R A (2005): *The Contemporary Carbon Cycle*. In: Schlesinger W H (ed.): *Treatise on Geochemistry*, Vol. 8. (Biogeochemistry). Amsterdam et al.: Elsevier, pp. 473-513
- Huhn O (2005): *Transfer von Nordatlantischen Tiefenwasser durch den Südatlantik mit Tracer-Verteilungen und Transitzeit-Verteilungen*. Dissertation Universität Bremen, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-diss000012067>
- IEA (2009): *Climate Policy for Energy Ministers at their G8 Meeting in Rome, Italy (2009) – Background Paper*, http://www.iea.org/Textbase/Papers/2009/G8_Climate_report.pdf
- IPCC (1996): *Climate Change 1995*. Intergovernmental Panel on Climate Change
- IPCC (2001): *Climate Change 2001*. Intergovernmental Panel on Climate Change http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm
- IPCC (2006): *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Table 4.12
- IPCC (2007): *Climate Change 2007*. Intergovernmental Panel on Climate Change http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm
- Jacobeit J (2007): *Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem*. In: Endlicher W, Gerstengarbe F-W (eds.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, pp. 1-16
- Janssen I A, Freibauer A, Schlamadinger B, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Heimann; M, Nabuurs G-J; Smith P, Valentini R, Schulze E-D (2005): *The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale –*

- a European case study*. In: Biogeosciences, Vol. 2, pp. 25-26
- Kaiser M, Krug S (2008): *Kein Klimaschutz ohne Urwaldschutz. Plädoyer für eine Kooperation zwischen Klima- und Biodiversitäts-Konvention*. In: Natur und Landschaft, Vol. 83, pp. 168-170
- Kemfert C (2008): *Kosten des Klimawandels ungleich verteilt: Wirtschaftsschwache Bundesländer trifft es am härtesten*. In: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Wochenbericht Nr. 12–13/2008, pp. 137-142
- KfW / ZEW CO2 Panel (2009): *Leaving the Trial Phase behind – Preferences & Strategies of German Companies under the EU ETS*. KfW-Bankengruppe. Frankfurt am Main
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2007): *Anpassungen an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU*. Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften
- Lancaster University (2005): *Solid reveal global warming paradox*.
<http://domino.lancs.ac.uk/info/lunews.nsf/x/9489D6192366CB3580256FE4004D591D>)
- Legendre L, Rivkin R B (2005): *Integrating functional diversity, food web processes, and biogeochemical carbon fluxes into a conceptual approach for modelling the upper ocean in a high-CO2 world*. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 110: C09S17
- Lewis S L, Lopez-Gonzalez G, Sonké B, Affum-Baffoe K, Baker T R, Ojo L O, Phillips O L, Reitsma J M, White L, Comiskey J A, Djuikouo M, Ewango C E N, Feldpausch T R, Hamilton A C, Gloor M, Hart T, Hladik A, Lloyd J, Lovett J C, Makana J, Malhi Y, Mbago F M, Ndangalasi H J, Peacock J, Peh K S, Sheil D, Sunderland T, Swaine M D, Taplin J, Taylor D, Thomas S C, Votere R, Wöll H (2008): *Increasing carbon storage in intact African tropical forests*. Nature 457, 1003-1006
- Loft L (2007): *Der Markt für biologische Kohlenstoffspeicherung als Finanzierungsinstrument für Schutzgebiete*. In: Korn H, Feit U (eds.): Treffpunkt Biologische Vielfalt VII 2006, Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skript 207 (2007), S. 79 – 87
- Luyssaert S, Schulze E, Börner A, Knohl A, Hessenmöller D, Law B E, Ciais P, Grace J (2008): *Old-growth forests as global carbon sinks*. Nature 455: 213-215
- Mahowald N M, Baker A R, Bergametti G, Brooks N, Duce R A, Jickells T D, Kubilay N, Prospero J M, Tegen I (2005): *Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean*. In: Global Biogeochemical Cycles, Vol. 19, Issue 4, article number: GB4025
- Meuli K (2005): *Wer mit Holz baut, schützt das Klima*. In: Umwelt, Vol. 3/05, pp. 36-37
- MLR (2000): *Forstprogramm Baden-Württemberg*. Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Stuttgart; http://www.wald-online-bw.de/fileadmin/lfv_pdf/wald/waldprogramm/nfp.pdf
- National Committee of the census of marine life (2006): *Biodiversity and ecosystem management: Approaches for researching the roles of marine and coastal biodiversity in maintaining ecosystem services*. A workshop sponsored by the U.S. National Committee of the census of marine life. September

11-13, 2006. Washington, DC

- Parish F, Sinn A, Charman D, Joosten H, Minayeva T, Silvius M, Stringer L: *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen
- Parker C, Mitchell A, Trivedi M, Mardas N (2009): *The Little REDD+ Book*. Global Canopy Programme. Oxford
- Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill J K, Thomas C D, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent W J, Thomas J A, Warren M (1999): *Poleward shifting in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming*. In: *Nature*, Vol. 399, pp. 579-583
- Parmesan C, Yohe G (2003): *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*. In: *Nature*, Vol. 421, pp. 37-42
- Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J-M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pepin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M (1999): *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core*. In: *Antarctica. Nature*, Vol. 399, pp. 429– 436
- Phillips OL, Lewis SL, Baker TR, Chao KJ, Higuchi N (2008): *The changing Amazon forest*. *Philos Trans Roy Soc B* 363(1498):1819-27.
- Portney P R, Weyant J P, eds. (1999): *Discounting and Intergenerational Equity*. Washington, D.C.: Resources for the Future.
- Ragueneau O, Schultes S, Bidle K, Claquin P, Moriceau B (2006): *Si and C interactions in the world ocean: Importance of ecological processes and implications for the role of diatoms in the biological pump*. In: *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 20, GB4S02, doi:10.1029/2006GB002688
- Raven J, Caldeira K, Elderfield H, Hoegh-Guldberg O, Liss O S, Ribesell U, Shepherd J, Turley C, Watson A J (2005): *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxid*. Policy Document 12/05. London: The Royal Society
- Revelle R, Suess H E (1957): *Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase in atmospheric CO₂ during the past decades*. In: *Tellus*, Vol. 9, pp. 18-27
- Ridgwell A, Hargreaves J C (2007): *Regulation of atmospheric CO₂ by deep-sea sediments in an Earth system model*. In: *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 21, GB2008, doi:10.1029/2006GB002764
- Ridgwell A, Kohfeld K E (2007): *Dust in the earth system: the biogeochemical linking of land, air, and sea*. In: Sammonds P R, Thompson J M T (eds.): *Advances in Earth Science*, Imperial College Press, pp. 51-68
- Riebesell U (2004): *Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton*. In: *Journal of Oceanography*, Vol. 60, pp. 719-729
- de la Rocha C D (2004): *The Biological Pump*. In: Elderfield H (ed.): *Treatise on Geochemistry* Vol. 6: The

- Oceans and Marine Geochemistry. Amsterdam et al.: Elsevier, pp. 83-111
- Sato T, Sato K (2002): *Numerical prediction of the dilution processes and its biological impacts in CO₂ ocean sequestration*. In: Journal of the Marine Technology Society, Vol. 6, pp. 169-180
- Schaffer H P (2008): *Die Vorratskammern sind voll*. In: Umwelt, Vol. 4/08, p. 29
- Smyth T J, Tilstone G H, Groom S B (2005): *Integration of radiative transfer into satellite models of ocean primary production*. In: Journal of Geophysical Research – Oceans, Vol. 110, doi:10.1029/2004JC002784
- Stern N (2006): *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm,
- Sterr H (2007): *Folgen des Klimawandels für Ozeane und Küsten*. In: Endlicher W, Gerstengarbe F-W (eds.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke – Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin*, pp. 86-97
- Tilman D, Reich P B, Knops M H (2006): *Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment*. In: Nature Vol. 441, Issue 7093, pp. 629-632
- Umweltbundesamt (2006a): *Klimagefahr durch tauenden Permafrost?* UBA-Hintergrundpapier, Fachgebiet I 4.1 „Klimaschutz“, Berlin: Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/veroeffentlichungen/permafrost.pdf
- Umweltbundesamt (2006b): *Umweltsituation in Österreich*. Achter Umweltkontrollbericht des Umweltministers an den Nationalrat. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0106.pdf>
- Vecsei A. (2004): *A new estimate of global reefal carbonate production including the fore-reefs*. In: Global Planetary Change, Vol. 43, pp. 1-18
- Vohland K, Cramer W (2008): *Doppelt geschützt hält besser*. In: Politische Ökologie, Vol. 109, pp. 20-23
- WBGU (1998): *The accounting of biological sinks and sources under the Kyoto Protocol: a step forwards or backwards for global environmental protection?* German Advisory Council on Global Change. Bremerhaven. 75 S.
- WBGU (2006): *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*. Sondergutachten. Berlin
- Wingenter O W, Haase K B, Zeigler M, Blake D R, Rowland F S S, Sive B C, Paulino A, Thyraug R, Larsen A, Schulz K, Meyerhöfer M, Riebesell U (2007): *Unexpected consequences of increasing CO₂ and ocean acidity on marine production of DMS and CH₂Cl₂: Potential climate impacts*. In: Geophysical Research Letters, Vol. 34, L05710, doi:10.1029/2006Glo28139, 2007

Anhang: Die naturwissenschaftlichen Hintergründe des Klimawandels

Um den Klimawandel und den Einfluss der Biosphäre auf das Klima und den Klimawandel zu verstehen, ist es wichtig, erst einmal einige grundlegende Begriffe zu erklären. Klima kann man definieren als die Summe der Witterungserscheinungen in der Atmosphäre über einen größeren Zeitraum hinweg (Heinrich, Hergt 1990). Um die Prozesse, die zur Entstehung des globalen oder eines lokalen Klimas führen, zu verstehen, reicht diese eher statistische Definition aber nicht aus. Das Klima entsteht aus einer Vielzahl von Wechselwirkungen der Atmosphäre mit der Erdoberfläche, den Ozeanen und grossen Gewässern und der Kryosphäre (zusammengesetzt aus Land-, Schelf- und Meereis) mit den Lebewesen unter dem Einfluss der Einstrahlung durch die Sonne. Diese Wechselwirkungen lassen sich als Kreisläufe auffassen. Das Zusammenspiel der verschiedenen Stoff- und Energiekreisläufe und ihrer Wechselwirkungen wird durch den Begriff Klimasystem gut umschrieben (Jacobeit 2007). Das Klimasystem ist so hoch komplex, dass wir es noch lange nicht vollständig verstanden haben. So bewegen sich einzelne Kreisläufe teilweise in sehr kurzen Perioden von einigen Tagen, aber auch in geologischen Zeiträumen von Hunderttausenden von Jahren, wobei sich der Kreislauf z.B. des Kohlenstoffs aus sehr unterschiedlich schnell ablaufenden Einzelprozessen und Einzelkreisläufen zusammensetzt.

Durch diese sehr verschiedenen Bestandteile des Klimasystems kommt es zu periodischen Schwankungen des Klimas, wie sie sich in den verschiedenen Warm- und Kaltzeiten der Erdgeschichte ausdrücken. Es muss also bei einer Klimaveränderung untersucht werden, ob es sich um natürliche Prozesse handelt, die ihre Ursachen in den periodischen lang dauernden Veränderungen des Systems haben, wie etwa Änderungen der Sonneneinstrahlung oder Plattentektonik, oder ob die Veränderungen durch diese in der Erd- und Menschheitsgeschichte beobachtbaren periodischen Erscheinungen nicht erklärbar sind. Die zur Zeit zu beobachtende Erderwärmung, die als Treibhauseffekt bezeichnet wird, ist durch die periodischen Veränderungen im Klimasystem nur zu einem kleinen Teil zu erklären. Der Hauptanteil der Veränderungen wird durch den Menschen verursacht.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre, die durch das Milliarden Jahre dauernde Wirken der Biosphäre entstanden ist, ist relativ einfach. Nach Heinrichs & Hergt (1990) setzt sich die Atmosphäre folgendermassen zusammen:

78,08 Vol-% Stickstoff	0,93 Vol-% Argon
20,95 Vol-% Sauerstoff	0,04 Vol-% andere Gase, davon 340 ppm Kohlendioxid, 18 ppm Neon, 5 ppm Helium und 2 ppm Ozon

Den Hauptteil bildet Stickstoff, der als wenig reaktives gasförmiges Molekül wichtig für das langsame Ablaufen der Prozesse in der Atmosphäre ist. Da das N₂-Molekül sehr reaktionsträge ist, kann es in dieser Form von den meisten Lebewesen nicht aufgenommen und in organische Verbindungen eingebaut werden. Das schaffen nur einige Bakterien, die etwa als Knöllchenbakterien den Leguminosen helfen, den atmosphärischen Stickstoff aufzunehmen und umzuwandeln.

Sauerstoff hat den mengenmässig zweitgrössten Anteil an der Atmosphäre. Die heutige Konzentration von Sauerstoff in der Atmosphäre ist vor allem durch die Aktivität der Blaualgen und später der anderen Pflanzen im Prozess der Photosynthese entstanden. In der Photosynthese wird die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie umgewandelt und dann in den Pflanzenkörper eingebaut. Aus Kohlendioxid und Wasser wird unter der Einwirkung des Sonnenlichts bei der Photosynthese Zucker. Damit steht das Sonnenlicht allen Lebewesen in umgewandelter Form zur Verfügung.

Obwohl in nur minimalen Mengen in der Atmosphäre vorhanden, haben doch auch die anderen Gase, wie Kohlendioxid, Wasserdampf, Methan und Ozon eine unverzichtbare Funktion für das Leben auf der Erde. Die Ozonschicht in der Stratosphäre fängt einen Teil des gefährlichen UV-Lichts ab. **Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O) und Methan (CH₄)** sind Treibhausgase. Dies bedeutet, dass sie das von der Sonne kommende kurzwellige Licht in der Atmosphäre passieren lassen, worauf es beim Auftreffen auf die Erdoberfläche in langwellige, energieärmere Wärmestrahlung umgewandelt wird. Gleichzeitig verhindern sie, dass die langwellige Strahlung in den Weltraum zurück reflektiert wird. Derselbe Effekt, das Durchlassen des energiereichen kurzwelligen Lichtes und das Reflektieren des langwelligen Lichtes wird durch Glasscheiben erreicht und für die Erwärmung von Treibhäusern genutzt.

Die Biosphäre und das Klimasystem haben sich auf die vorhandene Zusammensetzung der Erdatmosphäre eingestellt. Es gibt zum Beispiel durch Vulkanausbrüche oder andere Einzelereignisse kurzfristige Verschiebungen in der Zusammensetzung der Treibhausgase, aber durch verschiedene Regelmechanismen des Klimasystems stellen sich die ursprünglichen Anteile relativ schnell wieder ein. Dieser Puffermechanismus ist ein wichtiger Bestandteil aller sich selbst regelnden Systeme. Wird er überlastet, kann es zu schwerwiegenden Veränderungen des gesamten Systems kommen.

Der Kohlenstoffkreislauf

Der Klimawandel wird in erster Linie mit dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre in Zusammenhang gebracht. Kohlenstoff ist das für das Leben wichtigste Element. In allen organischen Verbindungen ist Kohlenstoff als tragendes Element vorhanden. Etwa 45% des Trockengewichts der Lebewesen bestehen aus Kohlenstoff. Durch den Aufbau von Kohlenstoffverbindungen wird bei der Photosynthese die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie umgewandelt. Dabei entstehen Sauerstoff und Wasser. Umgekehrt wird durch die Atmung beim Abbau der Kohlenstoffverbindungen mit Hilfe von Sauerstoff Energie für die Lebensprozesse freigesetzt. Dabei entsteht wieder Kohlendioxid.

Dieser physiologisch hoch komplizierte Kreislauf ist eingebettet in eine Reihe weiterer Kreisläufe. Während der Wachstums- und Lebensphase produzieren die pflanzlichen Lebewesen mehr Sauerstoff als sie wieder verbrauchen. Der nicht veratmete Kohlenstoff als wesentlicher Bestandteil wird in den Pflanzenkörper eingelagert und kann so von anderen Lebewesen aufgenommen werden. Beim Abbau des Pflanzenmaterials durch Pflanzen fressende oder Streu zersetzende Organismen entsteht bei Anwesenheit von Sauerstoff wieder CO₂. Wenn nicht vollständig zersetzte organische Substanz aus dem Kreislauf entzogen wird, beispielsweise durch die Ablagerung in

Meeressedimenten, kommt es zur Bildung fossiler Kohlenstoffverbindungen wie Kohle, Erdöl oder Erdgas. Erst die Gewinnung dieser fossilen Brennstoffe und deren Verbrennung durch den Menschen lässt wieder CO₂ entstehen. Der Kreislauf der organischen Materie dauert unterschiedlich lange, zwischen weniger als einem und mehr als 1000 Jahren (Houghton 2005). Tiere haben nur zu weniger als 0,1% Anteil am Kohlenstoff der lebendigen Organismen.

Ein Teil des Kohlenstoffs wird auch als Karbonat gebunden und von dort bei Verwitterung wieder freigesetzt. Im Wasser, vor allem der Ozeane, die zwei Drittel der Erde bedecken, löst sich Kohlendioxid. Dabei entsteht ein Gleichgewicht zwischen dem in der Atmosphäre befindlichen Kohlendioxid und dem in den Ozeanen gelösten, das von verschiedenen physikalischen Größen wie Druck oder Temperatur abhängt. Doch gilt für den Kohlenstoffkreislauf ebenso wie für das gesamte Klimasystem, dass die Kreisläufe, wie sie in den Lehrbüchern beschrieben werden, insgesamt unvollständig sind und der Verlauf der Materieflüsse nicht genau bekannt ist. Noch wichtiger ist, dass wir gerade erst zu verstehen beginnen, auf welche Weise sie sich gegenseitig beeinflussen (Grace 2004).

Obwohl Kohlendioxid bezogen auf die Wirkung des einzelnen Moleküls nicht das am stärksten wirksame Treibhausgas ist, ist es das mengenmäßig wichtigste. Der Anstieg des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre in den letzten 200 Jahren ist zu 60% für die vom Menschen verursachte globale Erwärmung verantwortlich.

Die Wirksamkeit verschiedener Treibhausgase stellt sich folgendermassen dar (Jacobeit, 2007):

	Kohlendioxid CO ₂	Methan CH ₄	Stickoxid N ₂ O
Mittlere Lebenszeit (Jahre)	50-200	15	120
Relatives Treibhauspotential (100 Jahre)	1	25	300
Anteil am natürlichen Treibhauseffekt	22 %	2 %	4 %
Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt	60 %	15 %	4 %

Der größte Teil des Kohlenstoffs ist mit 66 Millionen Gt in festem Gestein gebunden (1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen), das entspricht 99,92%, der zweitgrößte Teil im Tiefenwasser der Ozeane (38000 Gt, das entspricht 0,06%). Die restlichen 0,02% verteilen sich auf die Atmosphäre, die oberen Schichten der Ozeane und die Biosphäre (Girod 2006), wobei in der Vegetation und im Boden bis 1 m Tiefe etwa 2477 Gt gespeichert sind. In der Atmosphäre befinden sich etwa 750 Gt Kohlenstoff (Huhn 2005), in den oberen Schichten des Meers 700 Gt und die fossilen Brennstoffe enthalten etwa 10000 Gt Kohlenstoff.

Die oberirdische Landbiomasse enthält etwa 550 Gt Kohlenstoff, etwa 2/3 der Menge des in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffs. Die Böden enthalten im oberen Meter etwa 1500-2000 Gt, in

den oberen 3 Metern etwa 2300 Gt. (Houghton 2005). Untersucht man die Verteilung des Kohlenstoffs in Vegetation und Oberboden in den verschiedenen Vegetationstypen, so erhält man folgendes Bild (nach Houghton 2005) unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden):

Vegetationstyp	Kohlenstoff (Gigatonnen)	Vegetationstyp	Kohlenstoff (Gigatonnen)
Tropische Wälder	428-553	Gras- und Buschland gemässiger Breiten	304-199
Gemässigte Wälder	159-292	Wüsten und Halbwüsten	199-169
Boreale Wälder	559-395	Tundra	127-117
Tropische Savannen und Grassteppen	330-326	Landwirtschaftsflächen	131-169
Feuchtgebiete	240	Insgesamt	2477-2221

Ein wichtiges Kohlenstoffreservoir stellen die Permafrost-Böden dar, deren Fläche etwa 23 Millionen Quadratkilometer umfasst. Die durch den Permafrost vor Zersetzung geschützte Biomasse enthält 455 Gt Kohlenstoff, das ist etwa ein Viertel des im Boden vorhandenen Kohlenstoffs (Umweltbundesamt 2006a). Ein durch die Erderwärmung entstehendes verlängertes und tiefer reichendes Auftauen des Frostes im Sommer, wie es bereits beobachtet wird, setzt verstärkt Kohlendioxid und Methan frei (Umweltbundesamt 2006a). Vor allem die Abgabe des als Treibhausgas viel wirksameren Methans kann so die Erwärmung beschleunigen.

Von dem im Meer enthaltenen Kohlenstoff sind etwa 37000 Gt anorganisch, nur etwa 1000 Gt in organischen Verbindungen. Der größte Teil befindet sich in mittleren bis tiefen Wasserschichten, nur 700-1000 Gt befinden sich in Oberflächennähe und stehen mit der Atmosphäre in direktem Austausch. Der größte Teil des CO₂ dissoziiert zu Carbonaten und Hydrogencarbonaten, weniger als 1% ist gelöstes CO₂ (Houghton 2005). Zwischen diesen drei Stoffen besteht ein Gleichgewicht, das durch die verstärkte Aufnahme von CO₂ und damit Versauerung zu Gunsten von Hydrogenkarbonat verschoben wird.

Dieses Gleichgewicht hat wesentlichen Einfluss auf den Austausch von CO₂ zwischen Atmosphäre und Ozean. Wesentlich sind zudem zwei weitere Faktoren, die als Löslichkeitspumpe und als biologische Pumpe bezeichnet werden (Archer 2004).

Der Gasaustausch zwischen Wasser und Luft hängt u.a. vom Gasdruck ab. In der Vergangenheit lag der Partialdruck von CO₂ (d. h. der Anteil des Gases am gesamten Luftdruck) zwischen 180 µatm in glazialen und 280 µatm in interglazialen Perioden (Petit et. al. 1999). Heute ist der Druck bereits

auf 370 μatm angestiegen, was mit der Verbrennung von Öl, Kohle und Gas und der damit verbundenen Freisetzung fossil gebundener CO_2 - Vorräte zusammenhängt. Bei einem "Business as usual Szenario" landen wir Ende dieses Jahrhunderts bei 700 μatm (Houghton et al. 1995, 2001).

Die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre in den Ozean wird begrenzt durch den Austausch zwischen Oberflächenwasser und tieferen Wasserschichten, dadurch dauert die Herstellung eines neuen Gleichgewichts mehrere hundert Jahre (Sato, Sato 2002).

Die Löslichkeit von CO_2 in kaltem Wasser ist höher als in wärmerem. Das kalte Oberflächenwasser aus den nördlichen und südlichen Gebieten der Erde sinkt ab und lagert auf diese Weise einen höheren Kohlenstoffgehalt in den mittleren und tiefen Schichten des Ozeans. Dieser Mechanismus wird als Löslichkeitspumpe oder physikalische Pumpe bezeichnet. Die so genannte biologische Pumpe wird von abgestorbenen Lebewesen oder deren Exkrementen gebildet, sofern diese nicht von anderen Organismen als Nahrung aufgenommen werden, sondern in die mittleren und tiefen Schichten absinken und am Meeresgrund abgelagert werden. Die biologische Pumpe ist durch einen großen Komplex von Abhängigkeiten und Gleichgewichten gekennzeichnet. Sie hängt u. a. von der Konzentration und gegenseitigen Beeinflussung der Nährstoffe, von der Temperatur und dem pH-Wert des Meeres und der Zusammensetzung des Planktons ab. Jede Änderung kann sich trotz großer Puffermöglichkeiten des Systems auf die biologische Pumpe und damit auf den CO_2 -Gehalt im Wasser und in der Atmosphäre auswirken (de la Rocha 2004).

Je höher das spezifische Gewicht eines Organismus ist, desto schneller sinkt er und desto weniger Zersetzung und Re-Mineralisierung findet statt, bevor er den Meeresgrund erreicht. Die Ausbildung von Kalkskeletten ist ein verbreitetes Phänomen bei verschiedenen Gruppen marinen Planktons. Deren Produktion und Absinken produziert im Ozean einen kontinuierlichen Regen von Kalziumkarbonat, der in den Tiefseesedimenten landet. Neuere Modelle gehen von einer jährlichen Rate von 0,121 Pg C für diese Kohlenstoffsinkung aus. Eine ähnlich hohe Rate wird in Flachwasserzonen angenommen, hauptsächlich durch die Bildung von Korallenriffen und -bänken (Vecsei 2004).

Insgesamt haben die Ozeane zwischen 1800 und 1995 etwa 118 Gt Kohlenstoff aufgenommen, das entspricht etwa 27-34% der gesamten anthropogenen CO_2 -Emissionen (WBGU 2006). Wenn es keinerlei biologische Aktivität in den Ozeanen gäbe, wäre der CO_2 - Gehalt der Atmosphäre heute vermutlich um 50% höher. (Ridgwell, Kohfeld 2007).

In den britischen Gewässern nimmt das Phytoplankton 0,07 Gt Kohlenstoff pro Jahr auf, was etwa 0,1% der globalen Kohlenstoffproduktion entspricht. Der ökonomische Wert dieser Kohlenstoffbindung wird auf der Grundlage vermiedener Schäden auf £6 - £121 /t C geschätzt, was sich allein für Großbritannien zu einer Summe zwischen £420 Mio. und £8.47 Mrd. summiert. Und dies ist vermutlich eher eine Unterbewertung, denn es wird nur die Primärproduktion zugrunde gelegt. (Beaumont et al. 2006).

Wirkung des anthropogen verursachten Kohlendioxids

In den letzten Jahren wurden jährlich etwa siebeneinhalb Gt Kohlenstoff durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe ausgestossen, weitere eineinhalb Gt wurden durch Änderungen der Landnutzung wie Roden von Wäldern, Trockenlegen von Mooren oder Umstellung der landwirtschaftlichen Wirtschaftsweise freigesetzt. Von diesen neun Gt verblieben ungefähr vier in der Atmosphäre, 2 Gt wurden von den Ozeanen absorbiert, die restlichen drei Gt Kohlenstoff wurden von natürlichen Kohlenstoffsinken an Land aufgenommen (Canadell et al. 2007).

Obwohl der Anteil des vom Menschen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und Veränderung der Vegetation in die Atmosphäre gebrachten Kohlenstoffs im Vergleich zu dem in den aufgeführten Kreisläufen vorhandenen gering ist, hat er doch grosse Auswirkungen. Die Erhöhung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre von 275 ppm vor Beginn der Industrialisierung auf heute etwa 385 ppm überschreitet alle Werte, die aus den letzten 400.000 Jahren bekannt sind (Houghton 2005).

Besorgniserregend ist die immer noch andauernde Steigerung des Kohlendioxidausstoßes trotz aller politischen Beschlüsse. Betrug 1990 der Ausstoss von CO₂ noch 23,7 Gt CO₂, so war er 2004 auf 30,3 Gt CO₂ gestiegen (Henseling 2008).

In den letzten einhundert Jahren hat sich die globale Temperatur um ca. 0,74°C erhöht. Obwohl die Berechnung des genauen Ausmaßes der globalen Temperaturerhöhung schwierig und teilweise umstritten ist, lassen sich deren Konsequenzen in der Natur bereits beobachten. In einer Zusammenfassung verschiedener Analysen zu mehr als 1700 Tier- und Pflanzenarten konnten Camille Parmesan und Gary Yohe (2003) für 279 Arten Veränderungen nachweisen, die einen Einfluss des Klimawandels erkennen lassen. So wurde bei einer Stichprobe von 99 Arten von Vögeln, Schmetterlingen und Pflanzen belegt, dass sich ihr Verbreitungsgebiet gegen Ende des 20. Jahrhunderts im Schnitt pro Jahrzehnt um 6,1 km polwärts oder 6,1 Meter in die Höhe verschob. Bei 22 der untersuchten Schmetterlingsarten hat sich der Lebensraum im 20. Jahrhundert zwischen 35 und 240 km nach Norden verlagert. Bei Pflanzen verfrühte sich im gleichen Zeitraum der Blattaustrieb oder Blühbeginn um 2 bis 3 Tage. Diese und eine Vielzahl weiterer bislang durchgeführter Untersuchungen liefern so umfassende Belege, dass von einem Zufall nicht mehr gesprochen werden kann.

Aufgrund der Komplexität des Klimasystems lassen sich nur grobe Modelle entwickeln, um die langfristigen Folgen der Erwärmung der Erdatmosphäre einzuschätzen. Einige Auswirkungen lassen sich aber, wenn auch in ihrer Dimension unterschiedlich beurteilt, schon jetzt sicher voraussagen.

Die Erwärmung der Atmosphäre wird insgesamt eine starke Veränderung im Klima bringen. Zusammen mit den möglichen Änderungen der Meeresströmungen können sich regionale Abkühlungen oder Erwärmungen ergeben. Durch den höheren Energiegehalt in der Atmosphäre wird die Zahl und Stärke heftiger Wetterereignisse zunehmen. Die Niederschlagsverhältnisse werden sich regional differenziert verändern. Einige Gebiete werden stärker austrocknen, andere von intensiveren Niederschlägen betroffen sein.

Weitere Aspekte zur Rolle der Meereslebewesen im Klimasystem

Die Balance und der Erhalt der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und der Ozeane sind stark durch die Lebewesen im Meer beeinflusst (Legendre, Rivkin 2005). Neben dem Kohlenstoffkreislauf steuern sie biogeochemische Prozesse wie die Regulierung der flüchtigen organischen Halogenide, Ozon, Sauerstoff und Dimethylsulfide. Änderungen im Gleichgewicht der Nahrungskette bringen Änderungen in der Verteilung des Kohlenstoffs im Meer mit sich (Beaumont et al. 2006).

Eine ganze Reihe mariner biochemischer Kreisläufe haben klimatische Auswirkungen. Ein Beispiel dafür ist das Wechselspiel zwischen der Nahrungskette im Meer und der biogenen Schwefelverbindung Dimethylsulfid (DMS), die von Algen in den oberen Wasserschichten produziert wird. Sie wird teilweise in die Troposphäre abgegeben und oxidiert dort zu Schwefelpartikeln, die wiederum als Kondensationskerne für Wassertropfen fungieren. Die so entstehenden Wolken reflektieren das kurzwellige Licht und können so zur Verminderung des Treibhauseffektes beitragen. Klimatische Änderungen wirken sich wiederum auf die Nahrungskette im Meer aus, so dass sich der Kreislauf wieder schließt (Gabric et. al. 2001).

Ein anderer wichtiger Kreislauf ist der des Eisens. Eisen wird vor allem durch Stäube in die Atmosphäre verbracht und wandelt sich dort auf noch ungeklärtem Weg von seiner unlöslichen in lösliche Formen um. Da Eisen ein wichtiger Düngungsfaktor für das Phytoplankton ist, kann vermehrter oder verminderter Eiseneintrag in das Meer die Produktion des Planktons und damit die CO₂-Bindung beeinflussen (Mahowald et. al. 2005, Archer 2004).

Da Kieselalgen, die eine wichtige Rolle bei der Primärproduktion im Ozean spielen, für ihre Skelette Silizium benötigen, beeinflusst auch der Silizium-Kreislauf die CO₂-Aufnahme durch den Ozean, obwohl viele Punkte noch ungeklärt sind (Ragueneau et.al. 2006).

Ein anderer Aspekt ist die mögliche Zunahme der Produktion des Phytoplanktons durch vermehrtes CO₂-Angebot. Raven und Mitarbeiter (2005) konnten bei Planktonarten experimentell eine erhöhte Photosyntheserate um 10% bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration nachweisen. Jedoch gilt das nur für einen Teil des Phytoplanktons, andere Arten reagierten neutral oder empfindlich gegen die CO₂-Erhöhung. Allerdings scheinen andere Faktoren wie Temperatur und Nährstoffangebot eine größere Rolle zu spielen als das CO₂-Angebot.

In einem großangelegten als Mesokosmosversuch (PeECE) bezeichneten Versuch im offenen Meer vor Norwegen untersuchte Ulf Riebesell vom Kieler Leibniz Institute of Marine Sciences (IFM-GEOMAR), wie sich die Lebensgemeinschaften im Meer unter steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen ändern. Auch hier zeigte sich, dass verschiedene Phytoplankton-Arten unterschiedlich sensibel auf durch höheren CO₂-Gehalt fallende pH-Werte reagieren. Die Änderung der Zusammensetzung des Mikroplanktons bei unterschiedlichem CO₂-Gehalt kann Auswirkungen auf die CO₂-Bindung des Meeres durch die biologische Pumpe haben (Riebesell 2004). In einem späteren Versuch ermittelten Riebesell und Kollegen, dass der CO₂-Anstieg auch einen Anstieg von Dimethylsulfid und Chlorjodmethan bewirkte, da das Gleichgewicht des Phytoplanktons sich zu Arten verschob, die diese Stoffe produzierten. Dimethylsulfid bildet Aerosole, die zu Wolkenbildung und damit zu Verringerung der Einstrahlung führen, während Chlorjodmethan in der Atmosphäre zerfällt und das Jodion Ozon zerstört. Beides hat Auswirkungen auf den

Treibhauseffekt (Wingenterl et al. 2007).

Dadurch kann sich die Zusammensetzung der marinen Biosphäre mit den gesamten Nährstoffkreisläufen ändern, was wiederum Einfluss auf die CO₂-Speicherungskapazität und die gesamten biogeochemischen Kreisläufe hat. Der Gesamteffekt auf den Kohlenstoff-Kreislauf hängt letztlich von der Sensitivität all dieser Prozesse ab (Riebesell 2004).

Im Sediment tief unter dem Meeresboden der Tiefsee leben Bakterien und Archaeen, in einer Menge, die etwa ein Zehntel der gesamten Biomasse der Erde ausmacht. Archaeen sind neben Bakterien und Eukaryonten (zu denen Pflanzen, Tiere und der Mensch gehören) die dritte große Domäne des Lebens. Vor Peru wurden im Sediment des Meeresboden Archaeen gefunden, die in Gemeinschaft mit Bakterien in Anwesenheit von Schwefelverbindungen Methan abbauen und CO₂ produzieren. (Boetius, 2000; Biddle et al. 2006). An der Erdoberfläche sind es vor allem Bakterien, die Methan abbauen können und so den Treibhauseffekt verringern.