

Die Bedeutung von Böden und Humus im Kohlenstoffkreislauf

Von Dipl.-Geoökologin Christine Müller-Beblavy

Kohlenstoff ist der Grundbestandteil aller organischen Verbindungen. Der Kohlenstoffkreislauf setzt sich aus Speichern und Kohlenstoff-Flüssen zwischen diesen Speichern zusammen. In den Speichern liegt der Kohlenstoff (C) in unterschiedlicher Form wie anorganisch oder organisch, sowie in unterschiedlichen Aggregatzuständen vor. Ebenso ist der Kohlenstoff in den verschiedenen Sphären in teils sehr unterschiedlichen Mengen vorhanden. Dem Austausch zwischen den einzelnen Kohlenstoffspeichern kommt eine entscheidende Rolle zu. Die Speicher können als Senken oder Quellen fungieren, je nach Richtung des Austauschvorgangs. Der globale Kohlenstoffkreislauf hat viele verschiedene Komponenten, die berücksichtigt werden müssen. Man kann ihn als biogeochemischen Kreislauf bezeichnen, da der Kohlenstoff biologische, chemische und physikalische Prozesse durchläuft. Dies erfolgt in Form anorganischer Moleküle im Gestein (Lithosphäre), Boden (Pedosphäre), Wasser (Hydrosphäre) und Luft (Atmosphäre), aber auch in Form organischer Moleküle in den Lebewesen (Biosphäre) [1]. Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre, in der auch die Pedosphäre einbezogen wird, sind die vier großen Kohlenstoffspeicher.

Man kann den Kohlenstoffkreislauf unter verschiedenen Aspekten betrachten. Hier werden die einzelnen Speicher sowie die Austauschvorgänge unter Berücksichtigung der zeitlichen Dimensionen vorgestellt. Ebenfalls werden einzelne Teilsysteme wie Gestein, Landvegetation und Ozean herausgestellt.

Die Kohlenstoff-Speicher

Es lassen sich zwei verschiedene Speicherarten unterscheiden. Die eine Speicherform ist reich an Kohlenstoff, ihre Austauschrate ist jedoch sehr gering. Die zweite Speicherform zeichnet sich durch einen relativ kleinen Kohlenstoffgehalt, aber durch eine schnelle Umsatzrate aus.

Zu der ersten Speicherform zählt man die **Sedimente der Lithosphäre**. Sie ist der weitaus größte Kohlenstoffspeicher auf der Erde. Ca. 99,95% des gesamten Kohlenstoffs sind im Sedimentgestein in Form von Carbonaten (CO_3^{2-}) und Kerogen gespeichert. Unter Kerogen versteht man organische Stoffe, aus denen durch Überlagerung von Sedimenten Kohlenwasserstoffe gebildet wurden. Es kommt fein verteilt in sedimentären Gesteinen vor und wird auch als Erdölmuttergestein bezeichnet. In organischer Form kommt der Kohlenstoff noch als Erdgas, Erdöl und Kohle in der Lithosphäre vor. Insgesamt beträgt nach Schätzungen die Kohlenstoffmenge in der gesamten Lithosphäre **75.014.100 Gt** [1]. Diese Menge verteilt sich mit 35.000.000 GtC auf Calciumcarbonat (CaCO_3), also Kalkstein/Calcit. Ein C-Atom verbleibt durchschnittlich 342.000.000 Jahre im Kalkgestein. Calciummagnesiumcarbonat ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), der Dolomit, hat bei derselben Verweilzeit ein Umfang von 25.000.000 GtC. Die organischen Stoffe, Kerogen, betragen 15.000.000 GtC. Gashydrate in der Lithosphäre werden auf einen C-Gehalt von 10.000 Gt geschätzt und die fossilen Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle und Torf) auf 4.100 Gt [2].

Unter den fossilen Brennstoffen versteht man tote Biomasse, welche abgestorben ist und während Jahrmillionen durch geologische Vorgänge den Kohlenstoff gespeichert hat und verfestigt wurde. Kohle, Erdöl und Erdgas sind für die Energiegewinnung die wichtigsten fossilen Brennstoffe. Sie können direkt über die Verbrennung in nutzbare Energie umgewandelt werden.

Sterben Pflanzen ab und sind in bestimmten Gebieten vom Luftsauerstoff getrennt, können sie nicht vollständig zersetzt werden, Kohlenstoff reichert sich an. In erster Stufe entsteht Torf. Die Vertorfung ist der Beginn der sogenannten Inkohlung. Fließend geht sie in die biochemische Inkohlung über, bei der Weichbraunkohle entsteht. Mit den Jahren lagern sich Sedimente über dem Torf ab, wodurch ein gewisser Druck erzeugt wird. Dadurch entstehen Prozesse, die den Kohlenstoffgehalt auf 60-65% steigen lassen. Die heutige Braunkohle stammt hauptsächlich aus dem Tertiär, ist also maximal 65 Millionen Jahren alt. Sie findet sich in Tiefen von 500m und die Schichten sind etwa 60 Meter dick.

Darauf folgt die geochemische Inkohlung, die Hartbraunkohle und Steinkohle entstehen läßt. Die Prozesse brauchen viel Wärme und können daher nur in großen Tiefen stattfinden. Durch den höheren Druck und die höhere Temperatur entsteht zunächst Hartbraunkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von 70-75%.

Ein noch höherer Druck und Temperaturen von mindestens 300°C läßt Steinkohle entstehen. Hier steigt der Kohlenstoffgehalt auf über 75%. Steinkohle entstand von etwa 280 Millionen Jahren und liegt daher in tieferen Schichten in einigen tausend Metern. Die Kohleschichten sind nur bis zu einigen Metern dick und wechseln sich mit Gesteinsschichten ab. Diese Schichtbildung geht auf den Wechsel von Überschwemmungen und Trockenzeiten vergangener Erdzeitalter zurück. [3]

Der Boden, die **Pedosphäre** als Teil der Lithosphäre, speichert Kohlenstoff in Humus, Torf, Bodensedimenten und Mineralien. Die Schätzungen der Gesamtmenge belaufen sich auf 1500 GtC. Die in den Böden gebundene Kohlenstoffmenge ist etwa zweimal so groß wie in der Atmosphäre und dreimal so groß wie in der Vegetation [1].

Sterben Pflanzen oder Tiere, so wird die Biomasse im Boden durch Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze zersetzt, wobei aus den organischen Materialien Humus entsteht. Ein Teil des Kohlenstoffs dient den Zersetzern und Pflanzen als Stoffwechselbestandteil oder Nahrungsquelle und wird somit wieder in den Kreislauf zurück geführt. Ein Anteil von 20–30% wird in den Dauerhumus eingebaut und verbleibt mehrere Jahrzehnte, Jahrhunderte oder gar Jahrtausende im Boden. Daraus können wiederum fossile Brennstoffe entstehen [4].

Die Hydrosphäre muss nach den Umsatzraten und der Verweilzeit des Kohlenstoffs in Tiefsee und Oberschicht der Ozeane eingeteilt werden.

Die **Tiefsee** stellte einen weiteren wichtigen Speicher dar. Im Gegensatz zu der Oberschicht der Ozeane, in der der Kohlenstoff maximal 1 Jahr verbleibt, ist die Verweildauer in den tiefen Schichten des Meeres etwa 1000 Jahre. Das Meer speichert ca. 35.000 GtC und ist daher eine bedeutende Kohlenstoffsенke des Planeten.

Zu den Speichern mit einer hohen Umsatzrate gehört unter anderem die **Oberschicht der Ozeane**. Diese Schicht ist in ständigem Austausch mit der Atmosphäre verbunden. Hier liegt der Kohlenstoff als physikalisch gelöstes Kohlendioxid (CO_2), Hydrogencarbonat-Ionen HCO_3^- und CO_3^{2-} vor. Das chemische Gleichgewicht dieser Verbindungen im Wasser nennt man Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und wird bestimmt von der Temperatur, dem Druck, sowie dem pH-Wert und dem Salzgehalt des Wassers. Im Ozean sind überwiegend HCO_3^- enthalten. Über 70% der Erdoberfläche werden von den Ozeanen und ihren Nebenmeeren eingenommen, es verwundert darum nicht, dass sie eine sehr zentrale Rolle im Kohlenstoffkreislauf spielen [1].

Die **Atmosphäre** stellt neben der Biosphäre den kleinsten Kohlenstoffspeicher dar, doch ist sie aufgrund der Verbindung zu Hydrosphäre und Biosphäre und der schnellen Umsetzung ein sehr wichtiger Speicher. Aufgrund der geringen Größe des Speichers haben schon geringe Zuflüsse aus anderen Speichern einen großen Einfluss auf die Konzentration in der Atmosphäre. Hier ist der Kohlenstoff hauptsächlich als anorganische Verbindung wie CO_2 und Kohlenstoffmonoxid (CO), sowie als organische Form wie Methan (CH_4) gespeichert. Nach Schätzungen sind in der Atmosphäre ca. 790 GtC gespeichert [1].

In der **Biosphäre**, also in Pflanzen und Tieren, befinden sich rund 703 Gt C. Davon entfallen 700 Gt auf die Landlebewesen und nur 3 Gt auf die Lebewesen des Meeres. Der Kohlenstoff kommt in organischen Verbindungen wie Kohlenhydraten, Proteinen, Eiweißen und Fetten vor. Der in der Biosphäre enthaltene Kohlenstoff bleibt nicht dauerhaft gebunden. Zwischen den Organismen und ihrer Umwelt kommt es zu einem kontinuierlichen Kohlenstoff-Fluss. Dabei spielen Stoffwechselfvorgänge wie Photosynthese, Atmung und andere Vorgänge eine Rolle [1].

Tiere und Pflanzen sind einerseits Kohlenstoffspeicher, andererseits stehen sie in einem kontinuierlichen Gasaustausch mit der Atmosphäre. Bei der pflanzlichen Photosynthese findet eine Umwandlung physikalischer Lichtenergie in chemische Energie (Glucose/Zucker) statt. Dafür nimmt die Pflanze CO_2 aus der Atmosphäre und Wasser aus dem Boden auf. Es erfolgt die Fixierung von Kohlenstoff als Glucose, die Basis für weitere in der Pflanze synthetisierte Kohlenhydrate wie Stärke oder Zellulose. Während der Photosynthese nehmen Pflanzen also CO_2 auf, wobei Sauerstoff freigesetzt wird. Neben Pflanzen betreiben auch Bakterien und Algen Photosynthese.

Der gegenläufige Prozess ist die Atmung von Tier und Mensch. Tiere können Zucker nicht selbst erzeugen und müssen ihn ihrem Körper über die Nahrung zuführen. Er stammt also von den Pflanzen. Mit der Nahrung werden Kohlenhydrate aufgenommen, die in Stoffwechselprozessen zur Energiegewinnung umgebaut werden, wobei Kohlenstoff in Form von CO_2 als Abfallprodukt ausgeschieden werden muss. Dies findet während der Atmung unter Aufnahme von Sauerstoff statt. Beide Prozesse sind gegenläufig und weisen in etwa die gleiche Stoffbilanz auf [4]. Die Vorgänge lassen sich in Abb. 1. verfolgen.

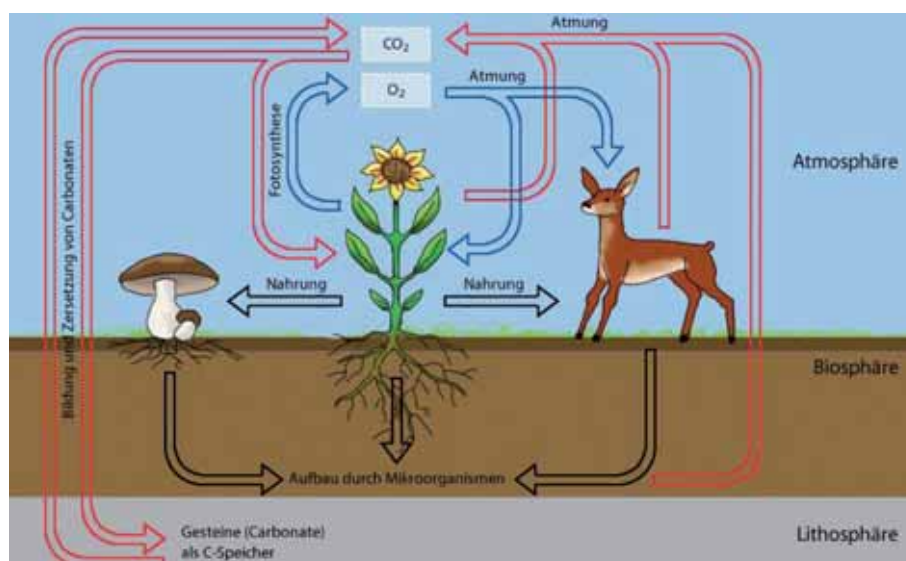


Abbildung 1: Kohlenstoff- und Sauerstofffluss in terrestrischen Ökosystemen.

Quelle: [1] nach Czihak 1996.

Die Kohlenstoffspeicher in Relation zueinander gesetzt, zeigt Abb. 2 wie mächtig der Carbonat-Speicher der Lithosphäre ist. Dazu wurden von der Universität Kiel die in den verschiedenen Speichern enthaltenen Kohlenstoffmengen in Schichten auf der gesamten Erdoberfläche verteilt. Die Schichtdicke entspricht den Kohlenstoffmengen. Nur die Masse des in der Lithosphäre als Carbonate bzw. des Kero gens Kohlenstoffs würde die Erde mit einer mehr als 120m hohen Kohlenstoffschicht bedecken. Die Schichtdicke der Kohlenstoffmasse von lebenden Organismen, toter Biomasse und der Atmosphäre betragen dagegen nur Millimeter und zeigen, wie gering ihr Anteil an der globalen Kohlenstoffmenge ist.

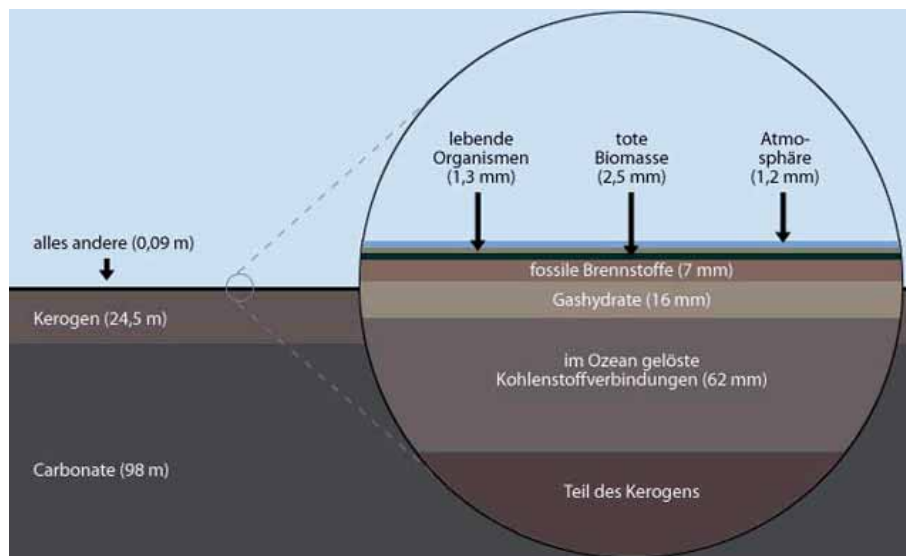


Abbildung 2: Schichtmodell der Kohlenstoffmengen. Quelle: [1]

Kohlenstoffumsetzung – Kohlenstoffaustausch

Zwischen den großen Speichern dieser Erde bestehen Verbindungen und dadurch auch an den Grenzflächen ein permanenter Austausch und Fluss von Kohlenstoff bzw. seiner chemischen Verbindungen. Nur 1% des auf der Erde vorkommenden Kohlenstoffs ist im Kreislauf „unterwegs“, d.h. im Fluss. [2].

Das große System Kohlenstoffkreislauf umfasst einzelne Teilkreisläufe, in denen der Kohlenstoff zwischen den Sphären fließt. Auch hier kann wieder eine durch räumliche und zeitliche Bedingungen getroffene Unterteilung erfolgen. So spricht man von einem kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf, der sich auf Zeiträume zwischen Stunden über Jahrzehnte bis zu Jahrtausenden bezieht, und dem langfristigen Kohlenstoffkreislauf, der Zeiträume von Jahrtausenden bis Jahrmillio nen berücksichtigt [1].

Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf

An diesem Kreislauf sind die Lebewesen beteiligt. Es laufen Prozesse wie Photosynthese und Atmung ab. Hier sind die Speicher entscheidend, in denen der Kohlenstoff nur eine relativ kurze Zeit verbleibt, die von Minuten bis zu Tagen, Jahren oder maximal einigen Tausend Jahren reicht. Dazu zählen vor allem die Atmosphäre, die lebenden Organismen und der Ozean. Somit spielen die Wechselbeziehungen zwischen der Atmosphäre, der Biosphäre und der Hydrosphäre eine bedeutende Rolle für den kurzfristigen Kreislauf. Wie bereits erwähnt sind die beteiligten Speicher extrem klein, die Flussraten in Relation dazu sehr hoch. Dies gilt für die Assimilation von CO_2 durch Photosynthese, die Freisetzung von CO_2 in der Atmung sowie den physikalischen Austausch von CO_2 zwischen Luft und Wasser durch Diffusion [1].

Richtung und Menge der Kohlenstoffbewegung im kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf lassen sich aus Abb. 3. ersehen.

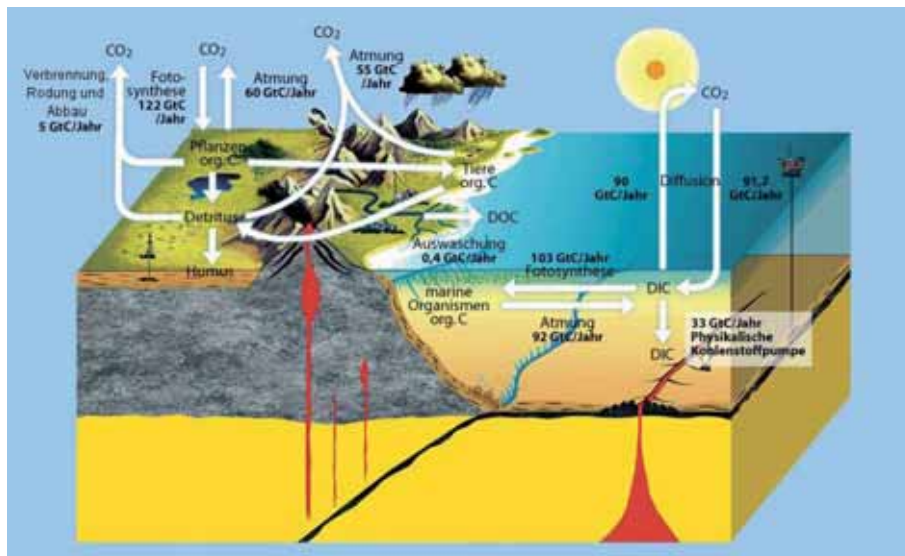


Abbildung 3: Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf. Quelle: [1] nach IPCC 2001

Durch die Photosynthese von Landpflanzen werden aus der Atmosphäre jährlich etwa 122 GtC als CO_2 entnommen. Marines Phytoplankton (Algen) nimmt bei der Photosynthese 103 GtC pro Jahr aus dem Wasser auf. Im Vergleich zur Masse der vorhandenen Landlebewesen zu den Meeresorganismen sind die marinen Speicher „leistungsfähiger“ bei der Kohlenstoffaufnahme.

Mit der Atmung geben Landpflanzen etwa 60 GtC pro Jahr in Form von CO_2 wieder an die Atmosphäre ab. Die restlichen 62 GtC werden als Nettoprimärproduktion, also als Biomasse, gebunden, die zum Teil von den Pflanzenfressern genutzt wird.

Ein Großteil dieser aufgebauten Biomasse fällt als Streu an und wird durch die Atmung heterotropher Bodenbakterien, die auch tote tierische Organismen verwerten, mineralisiert. So gelangen 55 GtC des ursprünglich gespeicherten Kohlenstoffs auf diesem Wege in Form von CO_2 wieder an die Atmosphäre zurück. Etwa 5 GtC der aufgebauten Biomasse wird unter anderem durch Waldrodung bzw. Holzverbrennung abgebaut. Der Rest wird in den langfristigen Kohlenstoffkreislauf in Form von schwer abbaubarem Humus übergeführt [1].

An der Phasengrenze zwischen der obersten Wasserschicht der Ozeane und der darüberliegenden Luft findet durch Diffusion ein Austausch von CO_2 statt. Tritt das CO_2 ins Wasser ein, reagiert es mit und CO_3^{2-} zu HCO_3^- . Ob und wie viel CO_2 sich im Wasser löst, hängt von der Konzentration (Druckunterschied) ab. Ist der CO_2 -Druck in der Atmosphäre hoch, löst sich CO_2 im Wasser. Bei umgekehrten Druckverhältnissen gibt das Wasser CO_2 an die Atmosphäre ab. Wie viel CO_2 sich im Wasser lösen kann, hängt von der Temperatur ab. In kaltem Wasser löst sich CO_2 besser. Hingegen entweicht aus tropischen und subtropischen Meere aufgrund ihrer Wärme viel CO_2 [Internet]. Schon eine Erhöhung der Wassertemperatur um 1°C , bewirkt das Ansteigen des CO_2 -Partialdrucks um 4,2% und damit eine weitaus höhere CO_2 -Abgabe an die Atmosphäre.

Am kurzfristigen Kohlenstoffkreislauf beteiligt sich auch die sogenannte „physikalische Kohlenstoffpumpe“, der Transport kohlenstoffdioxidhaltiger Wassermassen in große Tiefen des Ozeans. Die physikalische Pumpe bewirkt die Umverteilung von CO_2 in den verschiedenen Schichten der Ozeane. Dabei wird CO_2 durch den Austausch von Wasser der Schichten von der Oberfläche in tiefere Lagen transportiert. Dieser Austausch vollzieht sich nicht in allen Bereichen der Ozeane. Er wird vor allem durch starke, relativ konstante Winde gesteuert, die durch Verdrängung der warmen oberen Schichten ein Nachfließen kalten nährstoffreichen Wassers aus den unteren Lagen bewirken. Das absinkende Wasser kühlt sich ab und wird durch verschiedene Strömungen weitläufig verteilt. CO_2 besitzt in kaltem und stark salzhaltigem Wasser höhere Löslichkeit. Daher wird der Transport hauptsächlich durch kalte Meere wie den Nordatlantik gesteuert [4].

Die biologische Methanbildung ist ein Prozess, der in der Natur überall dort stattfindet, wo organisches Material in feuchter Umgebung und unter Luftabschluss durch die Stoffwechselaktivität natürlicher Methanbakterien verrottet. Beispiele hierfür sind die Entstehung von Sumpfgas, die Methanbildung im Verdauungstrakt von Wiederkäuern, in nassen Kompostierungsanlagen und in überfluteten Reisfeldern.

Beim anaeroben Abbau von Zellmaterial entsteht neben CO_2 auch CH_4 . Auch dieser Vorgang findet in Mikroorganismen statt [2].

Der langfristige Kohlenstoffkreislauf

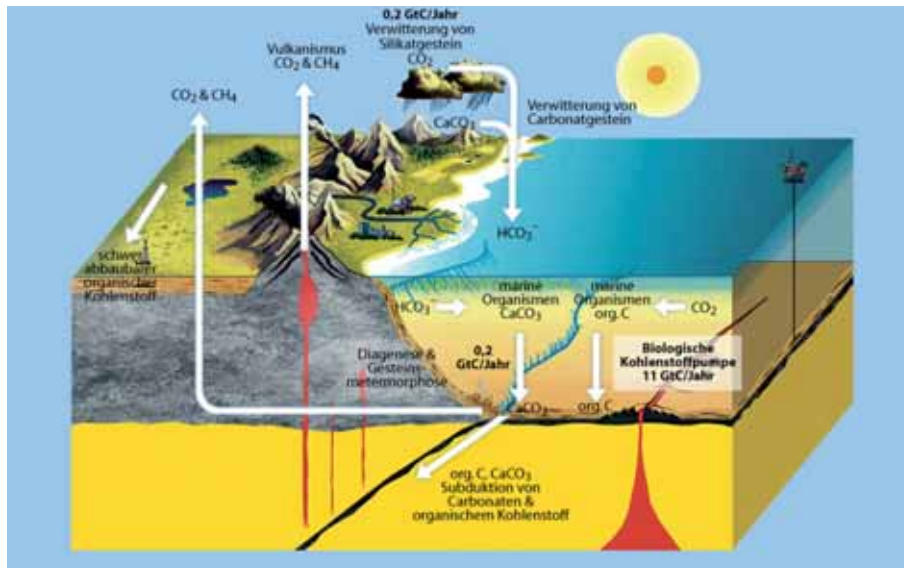


Abbildung 4: Der langfristige Kohlenstoffkreislauf. Quelle: [1] nach IPCC 2001

Beim langfristigen Kohlenstoffkreislauf handelt es sich vor allem um geochemische Prozesse. Sie laufen unter Beteiligung abiotischer Systeme in erdgeschichtlichen Zeiträumen ab. Der Kohlenstoff verbleibt dabei eine relativ lange Zeit von Tausenden bis zu Millionen oder sogar Milliarden Jahren in den Speichern. Zu diesen Speichern gehören Teilsysteme der Lithosphäre, die z.B. Carbonatgestein und fossile Brennstoffe enthalten. Die beteiligten Kohlenstoffspeicher sind extrem groß, die Flussraten im Vergleich dazu verschwindend gering, siehe dazu Abb. 4 [1]. Der Kohlenstoff-Austausch zwischen Atmosphäre und Lithosphäre wird durch Sedimentation, Diagenese, Gesteinsmetamorphose, Verwitterung und Vulkanismus bestimmt.

Bei der Diagenese und der Gesteinsmetamorphose wird CH_4 und CO_2 freigesetzt, das über Klüfte und Poren des Gesteins in die Atmosphäre gelangen kann. Auch durch vulkanische Aktivität wird CO_2 freigesetzt. Durch die genannten Ausgasungsprozesse werden weniger als 0,1 GtC pro Jahr aus der Lithosphäre freigesetzt. Die Abflüsse aus dem größten Kohlenstoffspeicher, der Lithosphäre, beeinflussen den Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre nur auf einer Zeitskala von Millionen von Jahren.

Bei der Verwitterung von Carbonatsteinen erfolgt ein Kohlenstoff-Fluss aus der Atmosphäre und der Lithosphäre in die Hydrosphäre. An der Verwitterung ist Kohlensäure (H_2CO_3) beteiligt. Sie entsteht durch Lösung von atmosphärischem CO_2 in Regen- oder Grundwasser. Trifft sie auf Gestein, das CaCO_3 bzw. $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ enthält, kommt es zu einer chemischen Reaktion, bei der HCO_3^- und Calcium-Ionen (Ca^{2+}) entstehen. Diese Verwitterungsprodukte werden über Flüsse in den Ozean transportiert. Insbesondere Ca^{2+} und CO_3^{2-} dienen dort Plankton, Muscheln und Korallen zum Aufbau von organischem Material und Kalkskeletten.

Im Meer kommt es zur Sedimentation von chemisch ausgefallenen Carbonaten, den Kalkskeletten von Organismen und organischen Reste abgestorbener Organismen. Die Sedimentationsrate im Meer wird auf etwa 0,2 GtC jährlich geschätzt. Sedimentation organischen Materials im Ozean führt in Verbindung mit dem Diageneseprozess zur Bildung von Erdöl und Erdgas [1].

Bei der biologischen Pumpe steht Phytoplankton im Mittelpunkt. Phytoplankton benötigt CO_2 für die Photosynthese. Selbst dienen die Algen wiederum als Nahrungsgrundlage für andere marine Mikroorganismen. Sterben Plankton und seine Fressfeinde ab, so sinkt ihr Gewebe ab und wird mineralisiert. Der Kohlenstoff wird zum größten Teil in gelösten anorganischen Kohlenstoff überführt, welcher wieder an die Oberfläche gelangt. Ein kleiner Teil lagert sich als Carbonatsediment ab.

Die Nettoprimärproduktion des Phytoplanktons wird auf 45 GtC jährlich geschätzt. Das Zooplankton setzt durch Veratmung wieder 34 GtC frei. Dies bedeutet, dass der Umfang des Kohlenstoffs, der durch die biologische Pumpe abwärts transportiert wird, ca. 11 Gt jährlich beträgt [4].

Menschliche Einflüsse

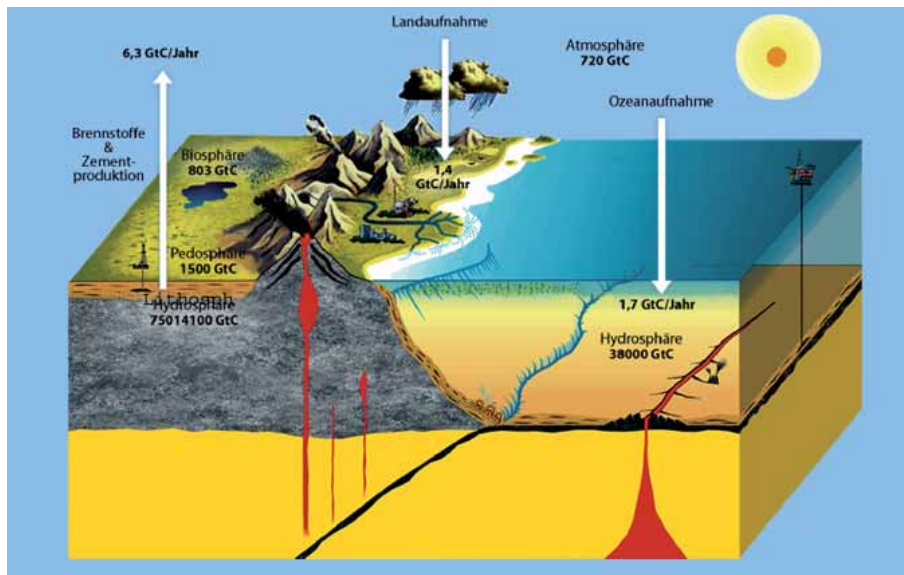


Abbildung 5: Umfänge der Kohlenstoffspeicher (in GtC) in der Atmosphäre, an Land und im Meer und Höhe der durch den Menschen beeinflussten c-Flüsse. Quelle: [1] nach IPCC 2001.

Der Mensch hat seit Beginn der Industrialisierung durch das Verbrennen von fossilen Brennstoffen, durch verstärkte Abholzung von Wäldern, Reisanbau, Massentierhaltung, etc. dazu beigetragen, dass der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre stark gestiegen ist. In den letzten 400.000 Jahren, die zurück verfolgt werden können, schwankte der CO_2 -Gehalt stets zwischen 180 ppm (Eiszeiten) und 280 ppm (Warmzeiten). Seit etwa 1850, also dem Beginn der Industrialisierung, hat er sich bis heute auf 365 ppm erhöht und steigt weiter. Nach Abb. 6 werden vom Menschen jährlich 6,3 Gt Kohlenstoff an die Atmosphäre abgegeben [1]. Richtung und Menge der durch den Menschen bewirkten Kohlenstoffbewegung im globalen Kohlenstoffkreislauf lassen sich aus Abb. 5. ersehen.

Durch die Erhöhung des Kohlenstoffs in der Atmosphäre diffundiert zurzeit mehr CO_2 in die Ozeane als umgekehrt. Dies kann so lange erfolgen bis sich ein neues Gleichgewicht der Partialdrücke von CO_2 zwischen Atmosphäre und Ozean eingestellt hat.

Der Ozean nimmt zur Zeit also im Meerwasser einen Teil des durch den Menschen freigesetzten CO_2 auf. Es diffundieren pro Jahr 1,7 GtC des anthropogenen Kohlenstoffs in das Meer, eine vergleichbare Menge (1,4 GtC) wird durch Steigerung der Vegetation an Land aufgenommen und etwa 3,2 GtC pro Jahr verbleiben in der Atmosphäre und verursachen einen Anstieg [1].

Beim Verbrennen von fossilen Brennstoffen wird der vor Jahrmillionen entstandene und gespeicherte Kohlenstoff freigesetzt und CO₂ entsteht. Dies ergibt eine Störung des natürlichen Kohlenstoffkreislauf, da die fossilen Kohlenstoffspeicher in einem Zeitraum von Jahrhundertmillionen Jahren angelagert wurden, durch den Menschen jedoch innerhalb weniger Jahrzehnte wieder freigesetzt werden [4]. Bäume werden meistens als Brennmaterial genutzt und die ehemals bewaldeten Gebiete zu Acker- und Weideland umgewandelt ohne einen Ausgleich für die Waldflächen zu schaffen. Werden die gerodeten Wälder nicht erneuert, so wird durch den Verlust der Wälder die Menge an freigesetztem CO₂ in der Atmosphäre erhöht. Durch die Waldrodung werden jährlich 2 GtC freigesetzt und durch die Zerstörung des Bodens nochmals 1 GtC. Die anschließende Bodenerosion, welche durch die Rodung verstärkt wird, bewirkt, dass der im Boden gespeicherte Kohlenstoff durch Oxidation in die Atmosphäre gelangt [4].

Kohlenstoffspeicherung im Boden – Humus

Vor allem Böden spielen eine entscheidende Rolle im Kohlenstoffkreislauf. Etwa 4/5 (81%) des weltweiten Kohlenstoffs, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf in der Biosphäre beteiligt ist, werden in unseren Böden gebunden. Dazu stehen im Vergleich nur 19% im Pflanzenreich.

Hierbei zeigen sich in unterschiedlichen Klima- und Bodenregionen große Unterschiede. So sind die Kohlenstoffvorräte in tropischen Wäldern zwischen Vegetation und Boden ausgeglichen. Im Vergleich dazu liegen in vielen anderen Ökosystemen wie den borealen Wäldern, den tropischen Savannen, Grasländern, Feuchtgebieten und landwirtschaftlich genutzte Flächen die Kohlenstoffvorräte im Boden erheblich über denjenigen der Vegetation [5]. Die geringere Kohlenstoffspeicherung in tropischen Böden hängt mit dem raschen Kohlenstoffumsatz der Streu unter den für Bodenmikroorganismen und Bodentiere optimalen Klimabedingungen der Tropen zusammen [6].

Wie kommt der Kohlenstoff in den Boden? Der Input von Kohlenstoff in den Boden wird durch Produktivität des Ökosystems, also die Biomasse und organische Düngung bestimmt. Output erfolgt durch Abbau der organischen Substanz, Entzug und Verlust durch Ernte, Brände, Bodenabtrag (Erosion) und Auswaschung [7].

Humus – Entstehung

Unter Humus versteht man die Vollständigkeit aller nicht lebender organischen Stoffe eines Bodens. Hierbei handelt es sich um eine große Zahl verschiedenartiger organischer Verbindungen, die grob in Streustoffe und Huminstoffe gegliedert werden. Unter Streustoffen versteht man Reststoffe von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen wie Cellulose, Lignin, Lipide, Wachse, Eiweißstoffe, Chitin u.a., die als Grundstoffe der abgestorbene Überreste, als Exkrememente auf und in den Boden gelangen [9]. Die Menge, die im Boden oder auf dem Boden entstehenden Streu beträgt im gemäßigten Klima zwischen 1 und 10t/ha a. [6]. Daneben stehen die häufig relativ schwer zersetzbaren und daher im Boden stabileren, oft dunkel gefärbten Huminstoffe. Sie entstehen durch Umsetzung der Streustoffe Tieren und Mikroorganismen. Die ablaufenden Vorgänge werden als Humifizierung bezeichnet [9]. Bei der Humifizierung handelt es sich somit um eine Speicherung bzw. Stabilisierung von Kohlenstoff im Boden. Werden Streustoffe oder Huminstoffe dagegen durch Mikroorganismen in ihre anorganischen Bausteine wie Kohlendioxid, Wasser und Ionen zerlegt, spricht man von Mineralisierung.

Der größte Teil der Pflanzenreste wird in relativ kurzer Zeit von Bodenorganismen mineralisiert und kann somit nicht als langfristiger Speicher angesehen werden. Ein kleiner Teil des Kohlenstoffs wird hingegen in Böden über einen langen Zeitraum als Humus gegen den Abbau stabilisiert und kann so ein Alter von mehreren Tausend Jahren erreichen [8].

Der Humusgehalt eines Bodens wird in der Regel als Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} bestimmt. Diese Begriffe werden synonym verwendet [9]. Huminstoffe lassen sich entsprechend ihrer Löslichkeit in alkaliunlösliche Humine und alkalilösliche Huminsäuren und Fulvosäuren unterteilen. Die beiden letzteren unterscheiden sich im Aufbau nicht stark von einander, jedoch in der Säurelöslichkeit. Fulvosäuren haben mehr Säuregruppen in ihrem Molekül und somit einen stärkeren Säurecharakter [10]. Dies äußert sich auch in einer erhöhten Mobilität, was zu einer durchschnittlichen Verweilzeit von nur 25–500 Jahre führt. Im Vergleich dazu haben Humine und Huminsäuren von Böden aus gemäßigten Breiten eine durchschnittliche Verweilzeit von 1100 Jahren. Der Kohlenstoffgehalt der Huminsäuren und der Humine liegt ebenfalls höher als bei den Fulvosäuren [6].

Einfluss auf die Bildung von Humus

Damit Kohlenstoff im Boden verbleibt, muss der Eintrag größer sein als der Austrag. In Böden unterschiedlicher Entstehung und Zusammensetzung sind verschiedene Mechanismen für die Akkumulation organischer Substanz verantwortlich. Viele Prozesse werden von langfristigen bodenbildenden Prozessen, wie z.B. der Verwitterung und Mineralneubildung, beeinflusst. Es zeigt sich, dass der Bodentyp und der Bodenentwicklungszustand für die Kohlenstoffspeicherung sehr wichtig sind [9].

Für die Speicherung von Kohlenstoff im Boden sind vor allem drei Mechanismen verantwortlich [8]:

- **Rekalzitranz:** Schwere mikrobielle Abbaubarkeit aufgrund der chemischen Struktur bestimmter Stoffgruppen des Humus.
- **Räumliche Trennung** der organischen Substanz und der zersetzenden Organismen. (Z.B. Aggregatbildung von Bodenpartikel mit organischem Material im Inneren)
- **Wechselwirkungen mit der Mineralphase:** Die Sorption von organischem Material an Mineraloberflächen wie an Tonmineralen oder Eisenoxide, kann zur Ausbildung unterschiedlich starker chemischer Bindungen sogenannter organo-mineralischer Komplexe kommen, die von Mikroorganismen nicht mehr angegriffen werden können.

Die Anreicherung von organischer Substanz aufgrund ihrer durch die chemischen Struktur bestimmten geringen Abbaubarkeit spielt wohl hauptsächlich im Oberboden und in der Anfangsphase des Abbaus eine Rolle. Für die Speicherung von organischer Substanz mit Umsatzzeiten von Jahren bis wenigen Jahrzehnten ist dagegen v.a. der Einschluss ins Innere von Mikro- und Makroaggregaten wichtig. Dadurch sind die organischen Stoffe vor Mikroorganismen und ihren Enzymen geschützt. Die Stabilisierung durch Sorption und Einschluss in Aggregate steigt mit zunehmender Bodentiefe [9].

Für die wirklich langfristige Festlegung ist v.a. die Bildung schwer angreifbarer organo-mineralischer Komplexe an die Oberflächen von Eisenoxiden und Tonmineralen verantwortlich. Die Anreicherung von Humus im Unterboden wird v.a. durch den letztgenannten Mechanismus bewirkt. Organische Stoffe können durch tief reichende und intensive Bewurzelung, intensive Wühltätigkeit von Bodentieren (Bioturbation) und das Einspülen wasserlöslicher organischer Verbindungen aus dem Oberboden in den Unterboden gelangen [9].

Auf die organische Substanz einflussnehmende und teils ebenfalls bodenbildende Faktoren sind folgende. Das Bodenklima in Form von Temperatur und Feuchte steuert die Aktivität der Mikroorganismen und damit die Zersetzungsgeschwindigkeit der Streu. Bei winterlichen Temperaturen ist der Zersetzungsgrad ebenfalls sehr gering und steigt bis zu den höchsten Bodentemperaturen an. Mittlere Feuchtebedingungen begünstigen die Streuzersetzung. Bei zu trockenen Böden verfallen viele Organismen in inaktiven Dauerformen und in nassen Böden wie Mooren ist die Zersetzung gehemmt, so dass sich organische Substanz anreichert. Die Mineralzusammensetzung des Bodens beeinflusst die natürliche Fruchtbarkeit eines Bodens und damit die Biomasse und den Streuanfall. Auch der Gehalt eines Bodens an Tonmineralen beeinflusst über die Bildung stabiler organomineralischer Komplexe den Humusgehalt. Die Bodenart bzw. das Körnungsverhältnis hat somit auch Einfluss auf den Humusgehalt.

Das Alter der Böden spielt in Bezug auf die organische Substanz eine entscheidende Rolle. Im Verlauf der Bodenentwicklung steigt der Gehalt an organischer Substanz zunächst schnell, später abnehmend bis er einen Höchstwert erreicht hat. Dies kann mehrere tausend Jahre dauern.

Die Art der Vegetation auf dem betrachteten Boden ist verantwortlich für die Produktivität und Zersetzbarkeit der Streu. Dies hat wiederum Einfluss auf die Bildung von Humus.

Als anthropogener Einfluss ist die Bewirtschaftung von Böden mit Pflügen, Düngung und möglicher Erosion zu sehen. Durch Pflügen wird die Zersetzung angeregt, weil die Streu eingemischt wird, die Böden besser belüftet und physikalisch geschützte Humuspartikel freigelegt werden. Deshalb ist unter sonst vergleichbaren Bedingungen unter Wald mehr Humus angereichert als unter Acker. Durch die Ernte wird organische Substanz dem Kreislauf entzogen, wobei der Entzug stark von der Art der Feldfrüchte abhängig ist. Durch unsachgemäße Bewirtschaftung kann die Bodenerosion durch Wasser und Wind gefördert werden [6].

Wirkungen von Humus

Der Humusgehalt eines Bodens wirkt sich positiv auf viele Eigenschaften von Böden aus. Genannt seien die Bodenfruchtbarkeit, die Wasserspeicherefähigkeit, die Nährstoffspeicherung und der Schutz vor Erosion [11].

Humus bietet für Bodenorganismen eine unerlässliche Nahrungsquelle. Sie sind für den ständigen Aufbau, Umbau und Abbau der Streu- und Huminstoffe, das Produzieren neuer Verbindungen, das Zersetzen organischer Schadstoffe und die Mineralisierung löslicher und gasförmiger Substanzen wichtig.

Humus hat entscheidenden Einfluss auf die Bodenstruktur, also die Aggregatbildung, die Verteilung von Bodenfeststoffen und der Poren und somit den Wasser-, Gas- und Wärmehaushalt von Böden. Humus begünstigt und stabilisiert die Bildung von grobporigen Aggregaten im Boden, bewirkt eine ausgeglichene Porengrößenverteilung und dadurch wiederum eine gute Infiltration und Wasserspeicherefähigkeit. Huminstoffe können gut als Wasserspeicher fungieren. Die dunkle Farbe der Huminstoffe lassen den Boden nicht so leicht auskühlen. Streustoffe und Huminstoffe sind wichtige Träger von Nährstoffen und können auch Schadstoffe speichern. Stickstoff, Phosphor und Schwefel sind strukturelle Bestandteile vieler organischer Verbindungen (z.B. Proteinen und Huminstoffe), werden so durch Mineralisierung freigesetzt und können dadurch von Pflanzen aufgenommen werden. An den riesigen, überwiegend negativ geladenen Oberflächen von Huminstoffen haften Nährstoff-Ionen in lockerer, austauschbarer Bindung und sind damit ebenfalls pflanzenverfügbar [9]. Je größer die innere Oberfläche des Bodens ist, also je kleiner die Bodenpartikel sind, desto mehr Nährstoffe können durch Adhäsionskräfte gehalten werden. Besonders günstig auf das Nährstoffvermögen eines Bodens wirken sich Tonminerale und Humus aus, da diese an ihren Oberflächen elektrische Ladungen besitzen.

Je höher der Ton- und Humusgehalt eines Bodens, desto höher ist (bei ansonsten gleichen Ein- und Austragsbedingungen) der Nährstoffgehalt. [10]

Humus wirkt sich also insgesamt auf die Pflanzenernährung, Schadstoffimmobilisierung, sowie auf den Wasser- und Lufthaushalt und als Erosionsschutz aus [9].

Verbindung von Stickstoff und Kohlenstoff

Der Humus stellt die Stickstoffquelle des Bodens dar. Das C/N-Verhältnis ist ein Indikator für den Abbau der organischen Substanz. Je enger (kleiner) das Verhältnis ist, desto höher ist die biologische Aktivität und desto weiter ist der Abbau der organischen Substanz fortgeschritten [5]. In frisch abgestorbener Substanz ist das C/N-Verhältnis weit (groß), wobei sich starke Unterschiede in Abhängigkeit von Pflanzenart, Pflanzenteil und Alter der Pflanze ergeben. Durch die biologische Aktivität im Boden verengt sich das C/N-Verhältnis.

In intensiv genutzten Böden ist Humusabbau immer mit einer beschleunigten Freisetzung von Stickstoff und Schwefel verbunden. Dabei besteht die Gefahr, dass ein großer Teil der Stoffe entweder als Nitrat bzw. Sulfat ausgewaschen wird oder durch eine vollständige Reduktion (Denitrifikation) gasförmig entweicht [9].

Bodenbewirtschaftung

Kohlenstoff kann im Humus für längere Zeiträume gebunden werden. Hier kommt nun der Bodennutzung eine entscheidende Rolle zu. Wird der Boden schonend genutzt ist die Kohlenstoffspeicherung größer als die Freisetzung. So kann Kohlenstoff für mehrere tausend Jahre im Boden festgelegt werden. Die mittlere Verweilzeit des organischen Kohlenstoffs in den Böden wird zwischen 26 und 40 Jahre eingeschätzt [8].

Im Vergleich zu Wiesen- und Waldböden geht intensiver Ackerbau wegen reduzierter Streuzufuhr und beschleunigter Mineralisierung meist mit Humusverlusten einher. Dies gilt insbesondere dann, wenn es durch falsche Bodenbearbeitung zur Erosion der Oberböden kommt. Durchgeführte landwirtschaftliche Studien haben ergeben, dass pfluglose Bodenbearbeitung zu einer Zunahme des C im Oberboden führt, dies jedoch oft zu Lasten des C-Vorrats im Unterboden [9].

Im Gegensatz zur Produktion von Nahrungsmitteln auf Äckern, die mit zumindest teilweiser einer Rückführung bzw. einen Verbleib von organischen Düngern bzw. Ernterückständen beinhaltet, kann die Erzeugung von Biomasse für energetische Zwecke die Bodenfruchtbarkeit gefährden. Es fallen fast keine oberirdischen Pflanzenrückstände mehr an und für Ernte und Abtransport werden schwere Maschinen eingesetzt. Dies führt oft zu Bodenverdichtung mit einer Veränderung des Gas- und Wasserhaushaltes, zur Veränderung der mikrobiologischen Aktivitäten und zur Beeinträchtigung des Humusaufbaus. Deshalb ist es erforderlich, auch für diese Art der Landnutzung nachhaltige Bearbeitungsmethoden zu entwickeln [9].

Nicht nur die Humusvorräte von Ackerflächen werden durch die meisten Bewirtschaftungseingriffe langfristig verändert und in der Regel vermindert, auch bei Waldböden ist dies der Fall. Solche humusverändernde Eingriffe sind die früher teilweise über Jahrhunderte ausgeübten Streunutzung, die Stammholz- und die Vollbaumernte, die Düngung und die Melioration degradiertter Waldböden insbesondere bei gleichzeitiger Bodenbearbeitung, die Kalkung, der Umbau von Nadelbaum-Reinbeständen in laubbaumreiche Mischwälder, die Durchführung von Kahlschlägen (sowie Sturmwürfe) und die Beweidung.

Durch den jeweiligen Eingriff ausgelösten Biomasseentzüge und die Veränderung der Mineralisationsbedingungen an der Bodenoberfläche und im Oberboden haben Einfluss auf den Humus. Besonders anfällig und durch Mineralisation gefährdet ist der Auflagehumus. Stabiler und vor dem Abbau geschützt ist der Humus im Mineralboden. Verluste an organischem Kohlenstoff aus dem Auflagehumus können häufig durch einen Anstieg der Corg-Gehalte im Mineralboden nicht vollständig ausgeglichen werden, sodass die Gesamtvorräte abnehmen. Dafür ist unter anderem die oft nur begrenzte Bioturbation verantwortlich [9].

Ändert sich die Landnutzungsform, z.B. von Wald zu Grünland, ist dies in vielen Fällen mit einem Verlust von organischer Substanz gekoppelt. Betroffen sind vor allem die Anteile an organischer Substanz, die in freier Form vorliegen, sowie diejenigen, die durch Aggregate geschützt sind. An Mineralien gebundene organische Substanz wird durch die Landnutzungsänderung dagegen nicht angegriffen. Dieser Anteil wird erst bei langfristiger landwirtschaftlicher Nutzung reduziert [9].

Die landwirtschaftliche Nutzung und Bewirtschaftungsmethode hat großen Einfluss darauf, wie viel Kohlenstoff im Laufe der Zeit im Boden gespeichert wird. Eine Änderung der Praxis sowie der Einsatzmittel, der angebauten Pflanzensorten, des Einsatzes von Düngemitteln, der Fruchtfolge- und Bodenbearbeitungsverfahren bestimmen, wie viel Kohlenstoff im Boden gespeichert bzw. aus dem Boden freigesetzt wird und wie schnell dies geschieht [12].

In den letzten Jahren hat der sogenannte pyrogene Kohlenstoff oder „Black Carbon“ zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen. Lange schon ist bekannt, dass bei der unvollständigen Verbrennung von Biomasse und fossilen Brennstoffen teilweise hoch kondensierte aromatische Verbindungen entstehen. Es gibt Hinweise, dass diese verkohlten Rückstände sehr stabil gegen mikrobiellen Abbau sind [7]. Solche Böden sind die Terra-Preta-Böden im Amazonasgebiet, die durch ihren hohen Gehalt an organischem Kohlenstoff, der vor allem in Form von Black Carbon vorliegt, dunkel gefärbt sind. Der Black Carbon ist sehr stabil und hält auch dem sonst in den Tropen üblichen schnellen Umsatz aufgrund der ständigen hohen Temperaturen und den feucht-humiden Bedingungen stand [7]. Schwarzerden enthalten ca. 10% des Kohlenstoffs in Form von Black Carbon. Hier nimmt der Anteil mit zunehmender Tiefe zu. Versuche haben gezeigt, dass nach 2 Jahren ca. 20% des Black Carbon von Mikroorganismen abgebaut worden sind.

Die tiefschwarze, humose und fruchtbare Erde Terra Preta kann Nährstoffe und Feuchtigkeit im Boden speichern. Die Terra Preta enthält Humus mit einer hohen biologischen Aktivität und vor allem sehr fein verteilte Holzkohle und Muschelkalk. Diese Mischung bewirkt, dass Nährstoffe im Boden gehalten werden und neue Nährstoffe gebunden werden. Terra Preta-Böden weisen einen hohen Gehalt von stabil gebundenem Kohlenstoff auf. Diese erhöhten Gehalte an Kohlenstoff tragen nicht direkt zum Nährstoffreichtum von Terra Preta-Böden bei, jedoch ist dadurch eine zusätzliche Speicherung von Nährstoffen möglich. Somit spielt Kohlenstoff eine bedeutende Rolle für die Bindung von pflanzenverfügbaren Ionen sowie für die Bodenstruktur [13]. Somit auch letztendlich auf die Humusbildung und die Speicherung von Kohlenstoff.

Wird ein humoser Boden mit Stickstoff, Phosphor und Kalium gedüngt, geht der Abbau von Humus vor allem in der Anfangsphase wesentlich schneller. Auch der sonst stabile Black Carbon wird dann abgebaut. Dies zeigt, dass die sorptive Stabilisierung über Tonminerale oder Eisenoxide offensichtlich auch für den Black Carbon gilt. Er ist also nicht allein so schwer abbaubar, sondern nur, wenn er in Wechselwirkung mit Bodenmineralien tritt.

Die alte organische Substanz (>1000 Jahre) und das Black Carbon sind vor allem in Unterböden zu finden. Eine Erklärung ergibt sich dadurch, dass dort noch genügend freie Oberflächen vorhanden sind, die sorptive Stabilisierung ermöglichen. Zum anderen spielt vermutlich die räumliche Entkopplung von Substrat und Konsumenten eine wichtige Rolle bei dem Erhalt der organischen Substanz im Unterboden [9].

Bedeutung von Böden

Der Boden ist die Grundlage für die Erzeugung von 90 % aller menschlichen Nahrungsmittel, des gesamten Viehfutters, aller Textilien und sämtlicher Brennstoffe. Er stellt die Grundlage für das Entstehen menschlicher Siedlungen dar. Der Boden liefert Rohstoffe, darunter Wasser, Mineralien und Baustoffe und speichert Kohlenstoff in Form von Humus. Er bildet einen wesentlichen Bestandteil der Landschaft, bewahrt die Überreste unserer Vergangenheit. Boden ist eine endliche Ressource. Eine begrenzte Wiederherstellung einiger Bodenfunktionen ist zwar möglich, jedoch lässt er sich innerhalb der für seine Regeneration benötigten Zeitspanne nicht erneuern [12].

Die Pufferkapazität des Bodens, sein Erholungsvermögen und seine Fähigkeit zur Filtrierung und Absorption von Schadstoffen haben zur Folge, dass Schäden erst erkannt werden, wenn sie bereits weit fortgeschritten sind. Dies ist möglicherweise einer der Hauptgründe, weshalb dem Bodenschutz nicht die gleiche Aufmerksamkeit gewidmet wurde wie dem Schutz der Luft und der Gewässer. Das ist aber ein wichtiger Grund, weshalb eine gute Überwachung der Böden erforderlich ist [12].

Die unterirdische Kohlenstoffumwälzung in Boden und Lithosphäre vollzieht sich langsamer als die oberirdische. Somit ist es möglich die Kohlenstoffspeicherung über einen längeren Zeitraum hinweg aufrechtzuerhalten. Der unterirdisch gespeicherte Kohlenstoff ist bei Bränden und anderen Ereignissen normalerweise besser geschützt als der oberirdische [12].

Humuszehrung in intensiv genutzten Böden – negative Folgen

Seit Mitte der 90er Jahre hat das Bewusstsein für die Bedeutung und Gefährdung der Böden deutlich zugenommen. Es gibt Schätzungen, nach denen 45% der Böden in Europa einen geringen (1–2%) oder sehr geringen (<1%) Humusgehalt aufweisen. Dagegen zeigen 40% der Böden einen mittleren Humusgehalt von 2–6% und nur 15% der Flächen besitzen einen Humusgehalt von über 6% [14]. Die Humusgehalte von Böden in verschiedenen europäischen Regionen gehen zurück. Es zeigt sich tendenziell ein Verlust an organischer Substanz. Dies trifft insbesondere auf Südeuropa zu. Diese Tendenz ist aber nicht nur dort zu beobachten. Es lässt sich feststellen, dass vorwiegend durch veränderte Bewirtschaftungsmethoden in der Landwirtschaft der Anteil der Flächen mit einem geringen Humusgehalt zugenommen hat [12].

Europas Böden sind durch zunehmenden und oft widerstreitenden Ansprüche aus Landwirtschaft, privaten Haushalten, Industrie und Gewerbe, Verkehr und Tourismus, rascher als je zuvor irreversiblen Verlust und Verschlechterung ausgesetzt. Sie werden belastet durch die hohe Konzentration von Bevölkerung und Aktivitäten auf begrenztem Raum, aber auch durch Klimaänderungen und Veränderungen bei der Flächennutzung. Boden stellt eine endliche, nicht erneuerbare Ressource dar, weshalb sich Schädigungen nicht ohne Weiteres beheben lassen. Eine der wichtigsten Aufgaben der kommenden Jahrzehnte besteht in der Lösung des Problems der unterschiedlichen Nutzungen und wie diese Nutzungsarten nachhaltig entwickelt werden können, ohne dass der Boden als Ressource geschädigt oder erschöpft wird [12].

EU-Böden enthalten rund 75 Milliarden Tonnen organischen Kohlenstoff. Im Vergleich emittiert die EU jährlich nahezu 2 Milliarden Tonnen CO₂ [15]. Von dieser Menge sind fast 50% in den Torfmooren Schwedens, Finnlands, des Vereinigten Königreichs und Irlands gespeichert. Schon 0,1% des Kohlenstoffs in europäischen Böden, der in die Atmosphäre entweicht, entspricht der Menge, die 100 Mio. zusätzliche Autos – etwa die Hälfte der derzeit auf unseren Straßen befindlichen Zahl – erzeugen würden. Ein Anstieg derselben geringen Menge Kohlenstoff in den Böden wäre etwa 200 Mio. EUR wert [15].

Eine besondere Bedeutung kommt dem Schutz von Böden mit hohem Kohlenstoffgehalt wie Torf bzw. Moore zu. Die Umwandlung in landwirtschaftliche Flächen oder Forstflächen, Verstädterung oder Erosion lässt auch die Kohlenstoffspeicherung sinken bzw. der Kohlenstoff wird freigesetzt [15].

Über die Anbaupflanzen und Ernterückständen und durch den Schutz der Böden vor Wasser und Regen mittels ständigem Pflanzbewuchs, weniger störenden Pflugtechniken und geringerem Maschineneinsatz kann über die Bodenbewirtschaftung Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung bzw. Freisetzung genommen werden. Auf diese Weise lassen sich Schätzungen zufolge jährlich zwischen 50 und 100 Mio. Tonnen Kohlenstoff in europäischen Böden binden [15].

Der Boden wird durch Klimaänderungen in Mitleidenschaft gezogen, die auch eine weitere Verschlechterung nach sich ziehen können. Gleichzeitig spielt der Boden über die Humusdynamik eine wichtige Rolle bei der Bindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre, trägt also zum Klimageschehen bei. Die organische Bodensubstanz und somit der gebundene Kohlenstoff geht durch die Bodendegradation verloren. Damit schwindet die Fähigkeit des Bodens, als Kohlenstoffsenke zu fungieren [12].

Das Verschwinden des organischen Bodenkohlenstoffs ist eine Veränderung des Bodens, die sich sehr rasch vollzieht. Der Verlust führt zu einer erheblichen Verschlechterung vieler Bodeneigenschaften wie Bodenstruktur und Artenvielfalt. Die geringsten Veränderungen beim organischen Bodenkohlenstoff, haben direkte, unvorhersehbare Folgen für den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre [12].

Laut EU hat sich die Qualität der Böden in den letzten Jahrzehnten erheblich verschlechtert. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen wird sich die Verschlechterung und der Verlust der Böden weiter verstärken. Dabei spielt die menschliche Tätigkeit eine ursächliche und verstärkende Rolle.

In einigen Regionen Süd-, Mittel- und Osteuropas ist die Degradation derart bedrohlich, dass die natürliche Fähigkeit der Böden wie Grundlage für menschliche Ansiedlungen und Ökosysteme, zurückgegangen ist und Wüstenbildung eingesetzt hat [12].

Folgende Prozesse tragen zur Verschlechterung der Bodenqualität bzw. teils irreversible Verluste des Bodens bei [16]:

- **Erosion:** Nach Schätzungen der Europäischen Umweltagentur sind 115 Mio. ha bzw. 12% des gesamten europäischen Festlands von Wassererosion und 42 Mio. ha von Winderosion betroffen, 2% davon schwer. Die Kosten dieser Bodenverschlechterung betragen Studien zufolge 0,7 – 14,0 Mrd. EUR jährlich [16]. Erosion von Boden durch Wasser und Wind ist besonders in Südeuropa und weiten Teilen Mittel- und Osteuropas ein gravierendes und durchaus erkanntes Problem. In den landwirtschaftlich genutzten Regionen des nördlichen Lößgürtels Europas und dort vornehmlich in Gebieten, wo erosionsanfällige Qualitätsböden einer intensiveren landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen, wird die Erosion ebenfalls zunehmend zu einem Problem [12].
- **Verluste organischer Substanz:** Der Gehalt an organischen Substanzen ist bei etwa 45 % der Böden in Europa gering oder sehr gering (0–2% organischer Kohlenstoff) und liegt bei weiteren 45% im mittleren Bereich (2–6% organischer Kohlenstoff). Dieses Problem ist insbesondere in südlichen Ländern, aber auch in Teilen Frankreichs, des Vereinigten Königreichs, Deutschlands und Schwedens zu beobachten. Die Kosten belaufen sich auf 3,4–5,6 Mrd. EUR jährlich. Die schwindende organische Bodensubstanz ist eine der Hauptursachen der fortschreitenden Wüstenbildung [EU]
- **Verdichtung:** Hier gibt es unterschiedliche Schätzungen über die Gebiete, die von Bodenverdichtung bedroht sind. Teils werden etwa 36% der Unterböden als stark verdichtet bzw. stark von Verdichtung bedroht eingestuft, andere Quellen gehen davon aus, dass 32% der Böden stark und 18% mäßig betroffen sind. Kostenschätzungen sind nicht möglich.
- **Versalzung** ist die Anreicherung löslicher Salze (insbesondere Natrium, Magnesium und Calcium) in den Böden. Etwa 3,8 Mio. ha der Böden in Europa sind davon betroffen. Am stärksten ausgeprägt ist diese Entwicklung in Kampanien (Italien), im Ebrotal (Spanien) und im Großen Alföld (Ungarn), aber auch in Teilen Griechenlands, Portugals, Frankreichs, der Slowakei und Österreichs. Es entstehen jährlich 158–321 Mio. EUR Kosten.
- **Erdbeben** treten häufig in Gebieten mit stark erosionsgefährdeten Böden, tonigen Unterböden, steilen Hängen, starken und ergiebigen Niederschlägen sowie aufgegebenen Flächen wie z. B. in den Alpen- oder Mittelmeerregionen auf. Bislang liegen noch keine Daten über die insgesamt in der EU betroffene Fläche vor. Je nach Ergebnis ergeben sich jährlich Kosten von bis zu 1,2 Mrd. EUR je Ereignis.
- **Kontamination** durch gefährliche Stoffe gibt es seit Zeiten der Industrialisierung. Schätzungen zufolge sind 3,5 Mio. Standorte möglicherweise und 0,5 Mio. Standorte tatsächlich verunreinigt und müssen saniert werden. Entstehende Kosten belaufen sich auf 2,4–17,3 Mrd. EUR jährlich.
- **Versiegelung:** Im Durchschnitt sind etwa 9% der Gesamtfläche der EU-Staaten versiegelt. In den Jahren 1990–2000 ist die versiegelte Fläche in der EU um 6% angewachsen. Die durch die Ausbreitung der Städte bedingte Nachfrage nach neuen Baugrundstücken und nach Verkehrsinfrastrukturen nimmt weiter zu. Es sind keine Kostenschätzungen möglich.
- **Rückgang der biologischen Vielfalt:** Die biologische Vielfalt in den Böden sorgt nicht nur für die Vielfalt der Gene, der Arten, der Ökosysteme und der Funktionen, sondern auch für die Fähigkeit des Ökosystems, Stoffe zu verarbeiten. Die biologische Vielfalt in den Böden wird durch alle oben aufgeführten Verschlechterungen eingeschränkt, und alle genannten Faktoren gelten (gleichermaßen) auch für den Rückgang der biologischen Vielfalt in den Böden. Es sind keine Kostenschätzungen möglich.
- **Versauerung:** Die Sanierung stark versauerter Böden ist schwierig, wenn nicht gar ganz unmöglich. In den mittel- und osteuropäischen Ländern verschärft sich das Problem möglicherweise weiter, bevor ein Rückgang eintritt. Versauerung stellt hauptsächlich in Nordwest- und Mitteleuropa ein Problem dar [12].

Bei den Kostenschätzungen ist die Schädigung der ökologischen Funktion der Böden nicht berücksichtigt, da sich diese nicht quantifizieren ließ. Dadurch dürften die tatsächlichen Kosten der Bodenverschlechterung noch über den genannten Schätzwerten liegen.

Auf Basis der Daten könnten sich nach Schätzungen die möglichen Kosten für die Verschlechterung der Bodenqualität infolge von Erosion, Verlust organischer Substanzen, Versalzung, Erdbeben und Kontaminierung für die EU auf bis zu 38 Mrd. jährlich belaufen.

Für die Gesellschaft fallen die Kosten in erster Linie in folgenden Bereichen an: Schädigung der Infrastrukturen wegen Sedimentaustrags, höhere Krankheitskosten bei den von Bodenverunreinigung betroffenen Menschen, Behandlung der durch die Böden belasteten Gewässer, Sedimentsablagerung, Wertverlust der Grundstücke in der Umgebung verunreinigter Standorte, erhöhter Kontrollbedarf bei der Lebensmittelsicherheit sowie Kosten im Zusammenhang mit der Rolle des Bodens im Ökosystem [16].

Böden und Klima

Vor diesem Hintergrund besteht ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Verbrennung fossiler Brennstoffe, Klimaänderungen, der Degradation von Böden und dem Kohlenstoff-Fluss. Die Bindung von Kohlenstoff in Böden stellt eine Möglichkeit zur Umkehrung der Bodendegradation dar. Wird dem Boden die Möglichkeit gegeben mehr Kohlenstoff zu speichern, nimmt die Degradation ab und umgekehrt [12].

Laut EU speichern die meisten Böden in Europa Kohlenstoff: Grünland und Wälder binden bis zu 100 Mio. Tonnen jährlich und wirken somit als Kohlenstoffsinken. Aus Ackerland wird hingegen zwischen 10 und 40 Mio. Tonnen Kohlenstoff jährlich freigesetzt. Es wirkt somit als Kohlenstoffquelle. Kohlenstoff kann aus Böden entweichen, wenn Grünflächen, bewirtschaftete Forstflächen oder natürliche Ökosysteme in Kulturland umgewandelt werden. Dieser Prozess kehrt sich nur langsam um, wenn Kulturland wieder in einen ursprünglichen Zustand übergeführt werden. Hier besteht ein Konflikt zwischen den unterschiedlichen Nutzungswünschen: Die wirksamste Strategie zur Reduktion der weltweiten Kohlenstoff-Freisetzung wäre die Einstellung der Flächenumwandlungen in Kulturland. Hier ergibt sich jedoch ein Konflikt mit dem weltweiten Anstieg des Nahrungsmittelbedarfs [15].

Eine fruchtbare Erde wie Terra Preta, die Kohlenstoff speichert, wäre hier die Lösung. Versuche zeigen, dass die Fruchtbarkeit dieser Erde doppelt so hoch ist wie die der Natur. Die Einlagerung von Kohlenstoff ist ein weiterer Vorteil der Erde. Bruno Glaser, Universität Bayreuth, hat festgestellt: Ein Hektar Terra Preta lagert 250 tC ein, ein Hektar gewöhnliche Erde im Vergleich dazu 100 tC. Global hochgerechnet könnten Böden im Jahr bis zu 9,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff einlagern [17].

Es lassen sich sogar degradierte Flächen wieder zur Nutzung gewinnen. Viele Studien haben nachgewiesen, dass sich durch Terra Preta unfruchtbare Böden in nachhaltig fruchtbare Böden umzuwandeln lassen. Allein die Existenz von Terra Preta in Amazonien beweist, dass es grundsätzlich und praktisch möglich ist, unfruchtbare Erde in nachhaltig fruchtbare Erde umzuwandeln. Dies ist für die weltweite Bodennutzung und Landwirtschaft von zukunftsweisender und nachhaltiger Bedeutung [13].

www.das-gold-der-erde.de

Die neue Terra Preta – Zukunft der Landnutzung!

Die für den Einsatz entwickelte neue Terra Preta ist ein nährstoffreiches Humussubstrat, in dem sämtliche Nährstoffe stabil gebunden sind. Es kommt zu keiner Auswaschung der Nährstoffe und die Pflanzen sind stets optimal versorgt. Die Bindung und Freisetzung der Nährstoffe erfolgt über sehr gute chemisch-physikalische Eigenschaften und über eine besonders ausgewogene Population von Mikroorganismen und Bodenpilzen [13].

Das Humussubstrat bietet hervorragende bodenbildende Eigenschaften, wie z.B. effektiver und aktiver Dauerhumusaufbau. Dies wirkt sich über Jahre positiv auf den behandelten Boden aus. Weitere positive Effekte sind hohe Wasserspeicherkapazität und gute Durchlüftung [13].

Terra Preta erweist sich als passendes Mittel, um zu einer effizienteren Ressourcennutzung und verbesserten Umweltqualität bestehender Bodennutzungen beizutragen. Verminderung von Stoffverlusten, gesundes Pflanzenwachstum und Bodenverbesserung sind nur einige positive Wirkungen. Darüber hinaus besitzt Terra Preta das Potential, über Initialisierung für die Wüstenbegrünung, Erosionsverminderung und Steigerung der Wasserhaltekapazität die fehlenden Funktionen von degradierten Böden nachhaltig wiederherzustellen.

Für eine Vielzahl von Klima und Boden betreffende Probleme kann der Einsatz von Terra Preta in vielen Bereichen einer dauerhaften Lösung bringen.

Literaturverzeichnis:

- [1] BAYRHUBER, E., HLAWATSCH, S., LUCIUS, E. (HRSG.) (2005): Der Kohlenstoffkreislauf Begleittext für Lehrkräfte. Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel
- [2] RÜHLE, N., PRIEGNITZ, J. (2002): Der Kohlenstoffkreislauf. Universität Osnabrück. Proseminar Prof. Dr. Michael Matthies. www.heuersdorf.de/Ckreis.pdf [10.04.2009]
- [3] BIOSPHÄRE – MAGAZIN FÜR UMWELTSCHUTZ (2007): Der biochemische Kohlenstoffkreislauf. www.biosphaere.info [10.04.09]
- [4] SCHOLTEN, T. (HRSG) (2006): Der Kohlenstoffkreislauf. Eberhard Karls Universität Tübingen Geographisches Institut
- [5] MAKESCHIN, F. (2009): Kohlenstoff im Boden – versteckt und unterschätzt. In: BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFT (HRSG.) (2009): Humus in Böden. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 35. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil
- [6] STAHR, K., KANDELER, E., HERRMANN, L., STRECK, T. (2008): Bodenkunde und Standortlehre. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer
- [7] MARSCHNER, B. (2009): Humusabbau: Stabilität und Labilität organischer Bodensubstanz. In: BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFT (HRSG.) (2009): Humus in Böden. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 35. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil
- [8] KÖGEL-KNABNER, I. (2009): Humusqualität und Standorteigenschaften In: BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFT (HRSG.) (2009): Humus in Böden. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 35. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil
- [9] REHFUESS, K., KÖGEL-KNABNER, I., MUNCH, J. (2009): Humus in Böden – Schlussfolgerungen aus dem Rundgespräch. In: BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFT (HRSG.) (2009): Humus in Böden. Rundgespräche der Kommission für Ökologie 35. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil
- [10] WITTIG, R., STREIT, B. (2004): Ökologie. Stuttgart: UTB Basics Ulmer
- [11] MIEHLICH, G. (2007): Humus im Boden und seine Bedeutung für das Ökosystem. www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/publrel.htm
- [12] EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR (EUA) & UNEP (HRSG.) (2002): Auf dem Boden der Tatsachen: Bodendegradation und nachhaltige Entwicklung in Europa. Umweltthemen-Serie No. 16. Kopenhagen: EUA. www.eea.eu.int
- [13] www.das-gold-der-erde.de [20.04.2009]
- [14] www.bodenwelten.de/bod_schatz/humus_u_boden/bod_europa.htm#verteilung [20.04.09]
- [15] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT (HRSG.) (2009): Klimawandel: Kommission unterstreicht die Bedeutung der Böden. IP/09/353. <http://europa.eu>
- [16] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT (HRSG.) (2006): Thematische Strategie für den Bodenschutz: Zusammenfassung der Folgenabschätzung. SEK(2006)1165. <http://europa.eu>
- [17] Langenbach, J. (2006): Bodenkunde: Kann Erde Treibhausgas schlucken? Alte indianische Kunst der Kultivierung – „terra preta“ – könnte beim Klimaschutz helfen. Die Presse. www.tropenwaldnetzwerk-brasilien.de/aktuell/news/news.brasil.20060831/index.html [20.04.2009]