

Der Boden im Klimawandel

Christian Bergmann



2015

Internationales
Jahr des Bodens

1 Das Internationale Jahr des Bodens

Die Uno hat das Jahr 2015 zum Internationalen Jahr des Bodens erklärt. Sie will damit die Öffentlichkeit auf die Bedeutung eines ökologischen Faktors hinweisen, der nur von wenigen verstanden und von den meisten als selbstverständlich ignoriert wird.

Professionelles Interesse am Boden haben in der Regel nur Landwirte, weshalb nicht überraschend die FAO (Food and Agriculture Organization) der wichtigste Protagonist des Internationalen Jahres des Bodens ist. Der Boden ist jedoch ein Faktor, der in fast alle Stoffwechselprozesse des Ökosystems der Erde einbezogen ist: er ist in den Kohlenstoffkreislauf genauso entscheidend involviert wie in den hydrologischen Kreislauf, er versorgt die Industrie mit Rohstoffen, bildet die (meist versiegelte) Grundlage für Siedlungen und Verkehrswege und greift durch seine Abbauprodukte in die ökologischen Haushalte von Gewässern ein.

Der Schutz des Bodens ist deshalb in den Gesetzen der meisten Länder als Bedingung nachhaltigen Wirtschaftens vorgeschrieben. Dennoch ist der Bodenschutz ein zu vielfältiges und unerforschtes Problem, um durch gesetzliche Vorschriften allein abgehandelt zu werden. Die Erhaltung des Bodens hängt von industriellen und landwirtschaftlichen Technologien ab, vom Entwicklungsstand eines Landes und seinem Einkommen. Die von der FAO und anderen Organisationen vertretenen Programme sind daher auf Einkommen und Entwicklung genauso bezogen wie auf die nachhaltige Bodennutzung, weil Entwicklung und Nachhaltigkeit auf Dauer nur zusammen existieren können (man könnte auch sagen, dass Nachhaltigkeit die Voraussetzung wirklicher Entwicklung ist).

Beim Bodenschutz haben sich in den letzten Jahren die Akzente verschoben: standen früher die Folgen anthropogener Schadstoffe für den Boden im Vordergrund (die Spanne reicht hier von Düngemitteln bis zu radioaktiven Abfallprodukten der Nuklearindustrie), wird mittlerweile die Folgelast der anthropogenen Klimaveränderungen immer wichtiger. Es spricht viel dafür, dass der Boden zusammen mit dem hydrologischen Kreislauf ein Frühindikator des Klimawandels ist. Negative Folgen treten früher und stärker ein als in anderen Bereichen, regional sind bereits katastrophale Entwicklungen möglich, wie zum Beispiel in den Dürregebieten Kaliforniens und Südostbrasilien.

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit den Grundfunktionen des Bodens und den Gefahren, die durch den Klimawandel für diese Grundfunktionen entstehen. Anschließend werden Strategien untersucht, die beim Schutz des Bodens im Klimawandel helfen können.

Die Erosion des Bodens beginnt im Regenwald oft sofort nach dem Fällen der Bäume. Foto: Greenpeace.de



2 Die ökologischen Funktionen des Bodens und der Einfluss des Klimawandels

Als Boden wird die oberste Schicht der Erdkruste bezeichnet. Wie weit der Boden in die Tiefe reicht, ist Definitionssache. Nach dem Bundesbodenschutzgesetz gilt der Teil der Erdkruste als Boden, der die Funktion einer Lebensgrundlage für Mensch, Tier, Pflanzen und Mikroorganismen bietet, Teil der Wasser- und Nährstoffkreisläufe ist und Puffer- und Reinigungsfunktionen für Stoffeinträge ausübt (Grundwasserschutz).

Die ökologische Rolle des Bodens ist die eines Speichers: innerhalb des Wasserkreislaufs speichert er Wasser, innerhalb des Kohlenstoffkreislaufs speichert er Kohlenstoff, innerhalb des Nährstoffkreislaufs speichert er Nährstoffe. In alle diese Speicherprozesse sind die Stoffwechselfvorgänge lebender Organismen einbezogen (Pflanzen und Mikrofauna), wodurch die mineralische (abiotische) Zusammensetzung des Bodens zwar nicht verändert, aber deren Nutzbarkeit entscheidend mitbestimmt wird.

Die industrielle Landwirtschaft hat lange gebraucht, um die biologische Bedingtheit der Bodenfunktionen zur Kenntnis zu nehmen. Es bedurfte einer ganzen Reihe von Gesetzen und Vorschriften, um das Bombardement mit Dünger und Schädlingsbekämpfungsmitteln unter Kontrolle zu bringen und die dabei verursachten Schäden an Bodensubstanz und Grundwasser zu beheben.

Mittlerweile gilt die Verbesserung der Bodenbiologie als wirkungsvolle und zugleich preiswerte Methode, die Produktivität des Bodens zu verbessern. Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Bodens steigen, weil eine reichere und zahlreichere Weltbevölkerung einen steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln und agrarischen Grundstoffen decken muss. Die Belastung durch den Klimawandel kann dabei an jeder Stelle der Bodenfunktionen wirksam werden.

Schwarzerdeboden (Chernozem) in der Region Kursk, Russland. Schwarzerdeböden sind besonders fruchtbar, weil sie hohe Anteile von Humus, Stickstoff und basischen Mineralien enthalten. Foto: University of Tennessee.



a) Der Boden im hydrologischen Kreislauf



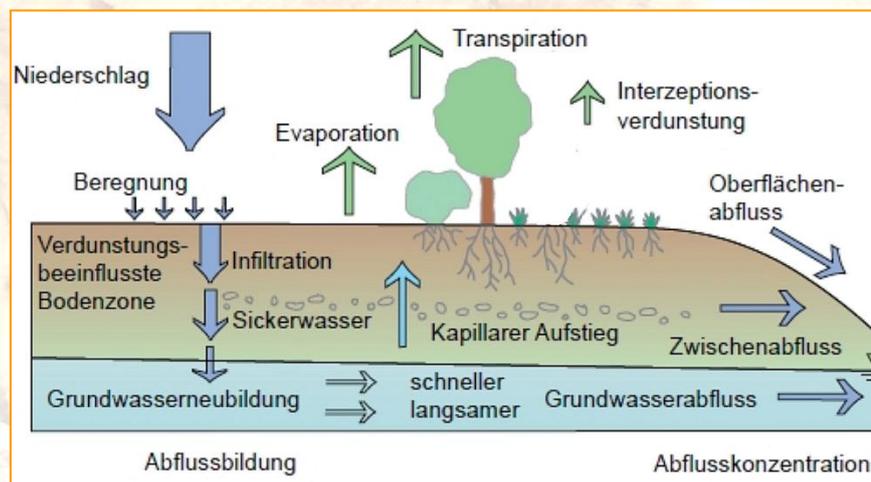
Der IPCC hat als Folge des Klimawandels eine Verstärkung des hydrologischen Zyklus vorausgesagt. Selbst wenn diese Voraussage zutreffen sollte, wird der Niederschlag nicht überall gleichmäßig ansteigen und die zunehmende Verdunstung ausgleichen können. Foto: forstcast.waldradio.de

Der Boden empfängt Wasser durch Niederschlag (einschließlich Taubildung), er gibt Wasser ab durch Verdunstung sowie Oberflächen- und Grundwasserabfluss (durch Quellen) in die Gewässer.

Gespeichert wird Wasser als Grundwasser und als Bodenfeuchtigkeit. Das Grundwasser insgesamt enthält 30% der Süßwasservorräte des Planeten, mehr als alle Oberflächengewässer zusammen¹. Die Erneuerung des Grundwassers erfolgt durch einsickerndes Niederschlagswasser, das bei seinem Weg durch die Bodenschichten wasserlösliche Stoffe aus dem Boden aufnimmt. Wie viel Niederschlagswasser auf diese Weise ins Grundwasser kommen kann, hängt von der Durchlässigkeit des Bodens ab, Verdichtung und Versiegelung des Bodens verstärken Oberflächenabfluss und Verdunstung, damit schwächen sie die Erneuerung des Grundwassers.

Die Bodenfeuchtigkeit enthält etwa genauso viel Wasser, wie in der Atmosphäre als Wasserdampf gespeichert sind, 0,0025% des gesamten Süßwasservorrats². Solange keine Bewässerungsanlagen existieren, ist die Bodenfeuchtigkeit die einzige Wasserquelle der Landwirtschaft, sie bestimmt aber auch die Mikrobiologie des Bodens und seine physische Stabilität. Bei Austrocknung wird der Zusammenhalt der Bodenbestandteile geschwächt und es setzt Winderosion ein.

Quelle: exaqt.info

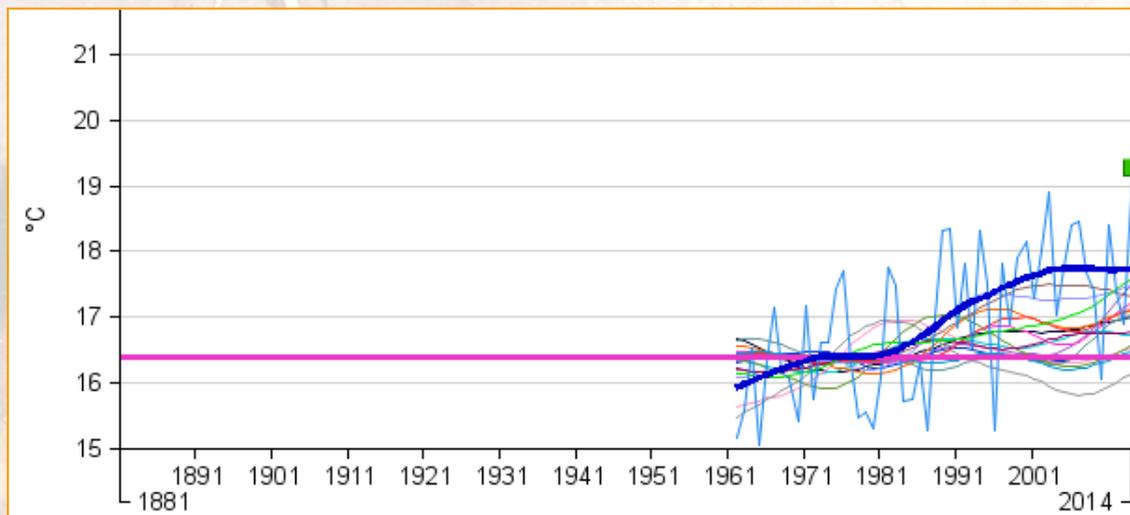


Klimawandel

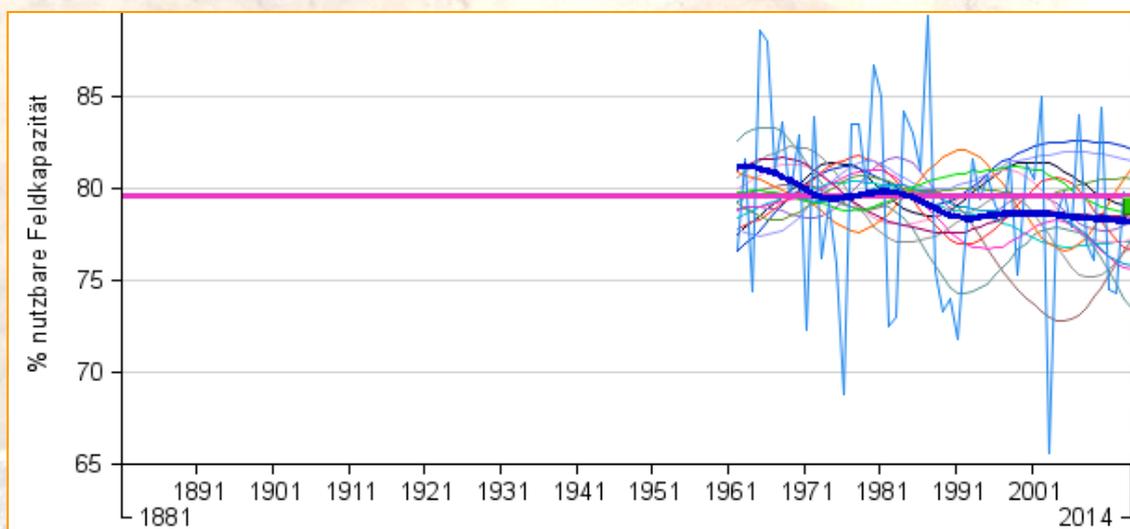
Das hydrologische Problem des Bodens besteht zunächst darin, dass die Treibhausgase Kohlendioxid und Lachgas schwerer sind als Luft und sich daher in der untersten Luftschicht (der laminaren Grenzschicht, in der wegen der Reibung nur geringe Luftbewegung auftritt) anreichern und mit den vom Boden produzierten Treibhausgasen mischen. Der Anteil von CO_2 in der Bodenluft kann bis zu 5% betragen³. Dadurch wird die Wärmeabstrahlung des Bodens in der untersten Luftschicht abgefangen, die sich dadurch erwärmt und die Wärme teilweise wieder an den Boden zurückgibt. Die Temperatur des Bodens steigt ebenso an wie Verdunstung. Übersteigt die Verdunstung die Menge des Niederschlags, setzt eine Verringerung der Bodenfeuchtigkeit ein.

Die Geologen Alan und Arthur Strahler sagen für große Teile Nordamerikas eine Verringerung der Bodenfeuchtigkeit im Lauf des 21. Jahrhunderts voraus, und zwar auch dort, wo die Niederschläge zunehmen⁴. Das bedeutet, dass die Verdunstung durch Erwärmung des Bodens und der Atmosphäre stärker steigt als die Niederschlagsmenge.

Maximale Oberflächentemperatur im Kalenderjahr in Deutschland. Die dunkelblaue Kurve zeigt den 30-jährigen geglätteten Durchschnitt, die hellblaue zeigt den Wert für ein Jahr, rosa: Durchschnitt 1961-1990, grünes Quadrat: Wert für 2014. Die feinen Linien stammen aus Rechenmodellen einzelner Klimaszenarien, die Werte sind alle kleiner als der geglättete Durchschnitt. Quelle: Deutscher Wetterdienst, Deutscher Klimaatlas, dwd.de, 15.7.2015, graphisch bearbeitet.



Bodenfeuchte, Wintergetreide, leichter Boden, Legende und Quelle: siehe oben.



Nach den Zahlen, die der Deutsche Wetterdienst in seinem Klimaatlas veröffentlicht, hat diese Entwicklung in Deutschland bereits begonnen. Bei aufs ganze Jahr gesehen gleichbleibenden Niederschlägen hat sich in den letzten 25 Jahren die Bodenfeuchtigkeit verringert, während die Atmosphärentemperatur um ca. 0,8° Celsius und noch stärker das Maximum der Oberflächentemperatur (1,3° Celsius) angestiegen ist.

Die überproportionale Zunahme von Bodentemperatur (relativ zur Atmosphärentemperatur) und Verdunstung von Bodenfeuchtigkeit ist wahrscheinlich als allgemeine Folge des Klimawandels zu betrachten. Sie trifft Regionen am stärksten, die unter zurückgehenden Niederschlägen leiden oder schon immer niedrige Niederschläge hatten. Die Toleranz des Bodens gegen Fehler bei der Bewirtschaftung nimmt ab; wenn Nährstoffschichten durch Erosion zerstört werden, treten nicht wiedergutzumachende Schäden auf.

Man kann die Austrocknung durch Bewässerung bekämpfen, aber wenn der Grundwasserspiegel sinkt, helfen nur noch teure Lösungen wie Kanal- und Pipelinebau sowie Meerwasserentsalzung.



Verdornte Kulturen in Kalifornien 2014/2015, Foto:dw.com. Das Stroh in der Pflanzung bezeugt die Anwendung von conservation agriculture (s.u.). Gegen Regenmangel kann auch dieses Instrument nichts ausrichten.

Bei geeignetem Boden und nachhaltiger Wasserversorgung sind auch Wüstengegenden kultivierbar (hier in Arizona). Vorteil: die zusätzliche Pflanzenproduktion absorbiert Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Nachhaltige Wasserquellen sind im Süden der USA jedoch selten geworden und werden durch die Verdunstungsverluste offener Kanäle nicht zahlreicher. Foto: akweltenbummler.





Der dem Hobbygärtner bekannte Kompostdünger hat in warmen Ländern eine wichtige Bedeutung, weil die Böden arm an organischem Kohlenstoff sind. Foto: „Compostador de bambú“.

b) Der Boden im Kohlenstoffkreislauf

Der Boden enthält je nach Schätzung zwischen 1100 und 1600 Gigatonnen Kohlenstoff in organischen Verbindungen. Nicht einberechnet sind die in Gesteinen gespeicherten Kohlenstoffmengen, die wegen ihrer chemischen Stabilität nicht an dem Kreislauf teilnehmen.

Der Boden erhält organischen Kohlenstoff durch Ausscheidungen und zerfallende Reste von Lebewesen, die im Boden durch Mikroorganismen zu Gasen abgebaut werden. Der Kohlenstoff wird in dieser Form abgegeben, entweder als Kohlendioxid CO_2 oder als Methan CH_4 , das unter anaeroben Bedingungen gebildet wird und oft schon auf dem Weg zur Oberfläche zu CO_2 oxidiert wird.

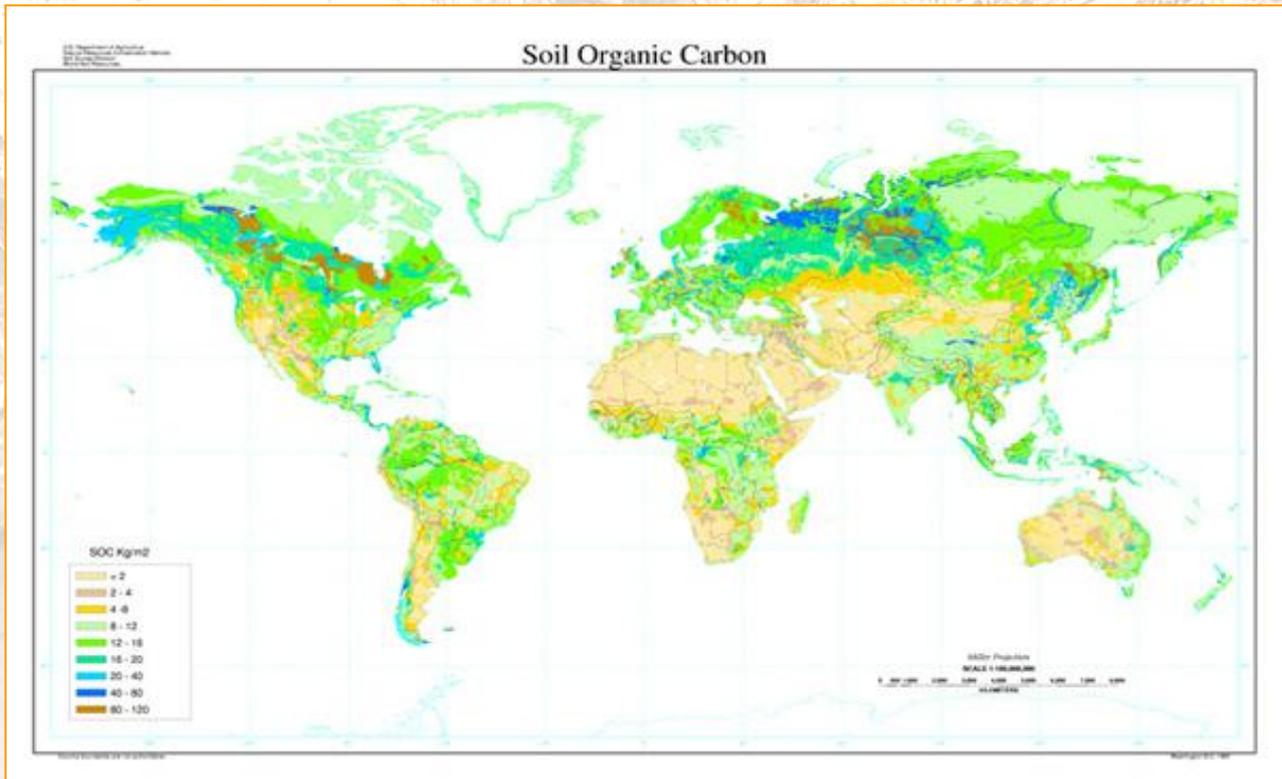
Die jährliche Kohlenstoffemission des Bodens beträgt schätzungsweise 60 Gigatonnen, das entspricht 222 Gigatonnen CO_2 (eine Tonne Kohlenstoff oxidiert ergibt etwa 3,7 Tonnen CO_2).

Im Idealfall eines perfekten Gleichgewichts wird die gesamte Kohlenstoffemission als CO_2 von Landpflanzen aufgenommen und durch Photosynthese als Kohlenwasserstoff gespeichert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die gesamte Methanemission durch Oxidation in der Atmosphäre in CO_2 verwandelt wird. Erdgeschichtlich hat es jedoch bedeutende Abweichungen gegeben, wenn Kohlenstoff als Kohle in der Erdkruste sedimentiert wurde oder der sehr große Kohlenstoffspeicher Weltmeer unter dem Einfluss von Temperaturänderungen des Wassers Kohlenstoff freisetzte oder wieder aufnahm.

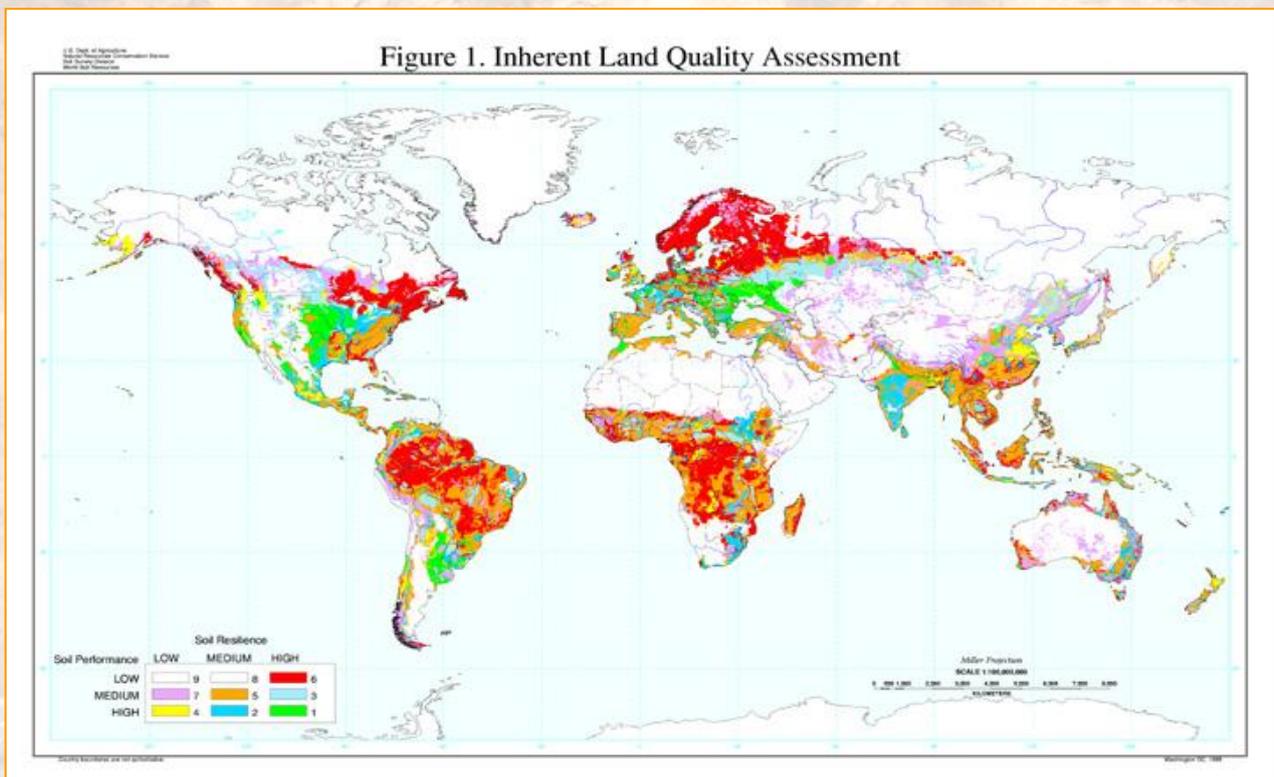
Landwirtschaftlich verwendbar sind vor allem Humus und seine Bestandteile, während Torf erst nach Trocknung und aufwendiger Bearbeitung durch Kalk und Dünger einen brauchbaren Zustand erreicht. Dicke Humusschichten können nur unter Bedingungen entstehen, bei denen die Abkühlung im Winter den vollständigen Abbau der Kohlenwasserstoffe im Boden verhindert. In warmen Regionen können Kohlenwasserstoffe nur als Torf in großen Mengen im Boden gespeichert werden. Eine sehr große Menge an Kohlenstoff ist in Form von Methan in Permafrostböden gespeichert.



In Regionen mit Tierhaltung können auch Gärreste aus Biogasproduktion als hochwertiger Dünger den Kohlenstoffbestand im Boden verbessern. Foto: joule.agrarheute.com



Die Böden mit dem höchsten Kohlenstoffgehalt (SOC=Soil Organic Carbon) sind nicht die mit der höchsten Qualität. Hohe Bodenqualität (Performance) und Widerstandsfähigkeit (Resilience) findet man bei Böden mit mittlerem Kohlenstoffgehalt. Quelle. US-Departement of Agriculture.



Klimawandel

Unter Bodenforschern und Agronomen ist es unumstritten, dass eine Erwärmung des Bodens im Klimawandel zu einem Ansteigen seiner Kohlenstoffemissionen führt. Brisant wird dieses Problem durch das Mengenverhältnis von Bodenemissionen und anthropogenen Emissionen: die Bodenemissionen sind um den Faktor 6-7 mal größer als die anthropogenen Emissionen. Das bedeutet, dass eine prozentual kleine Vergrößerung der Bodenemissionen einem 6-7 mal so großen prozentualen Zuwachs bei den anthropogenen Emissionen entspricht. Die Bodenemissionen von CO₂ und Methan sind also ein bedeutender Rückkoppelungsfaktor bei der Erwärmung der Atmosphäre.

Nach einer von Koch zitierten Studie^{*5} hat die jährliche Kohlenstoff-Emission des Bodens von 1989 bis 2008 um 1,9 Gigatonnen zugenommen, das entspricht 7,03 Gigatonnen CO₂ oder knapp 22% der anthropogenen CO₂-Emissionen von 2008 (32 Gigatonnen^{*6}).

Die Treibhausgasreduktionsziele der Industrieländer werden so zur Makulatur, weil jede tatsächlich erreichte Reduzierung durch die Erhöhung der Bodenemissionen wieder ausgeglichen wird.

Einige Forscher richten ihre Hoffnungen auf die Zusammensetzung des Humus. Da der größte Teil des Humus als langlebiger Humus vorliegt (z.B. Lignin) und nur ein kleiner Teil in kurzlebiger Form (z.B. Polysaccharide), werde sich der Abbau des organischen Materials verlangsamen, wenn sich der Anteil der kurzlebigen Bestandteile verringert habe^{*7}.

Ein anderer entgegenwirkender Faktor ist die verstärkte Aufnahme von CO₂ durch Pflanzen. Pflanzen können bei erhöhtem CO₂-Gehalt der Luft mehr CO₂ aufnehmen, wenn ausreichend Wasser und Stickstoff im Boden sind. In ähnliche Richtung wirkt die Verlängerung der Vegetationsperiode in den kalten und gemäßigten Regionen. Vegetationsverluste durch Dürre oder das großflächige Abholzen von Wäldern können diesen Effekt jedoch zunichtemachen.



Wenn Wälder auf Torfboden durch Brandrodungen zerstört werden, gerät häufig der Torfboden selbst mit in Brand. Dabei werden ungeheure Mengen an CO₂ freigesetzt. Foto: Greenpeace.de.

c) Der Boden im Nährstoffkreislauf

Der Boden enthält neben Kohlenwasserstoffen noch andere Stoffe, die man als Nährstoffe bezeichnen kann, da die Pflanzen für ihr Wachstum auf diese Stoffe angewiesen sind. Das sind Stickstoff, Phosphate und andere mineralische Elemente wie Eisen, Kalzium, Magnesium, Schwefel etc., die in wasserlöslichen Verbindungen von den Pflanzen aufgenommen werden können.

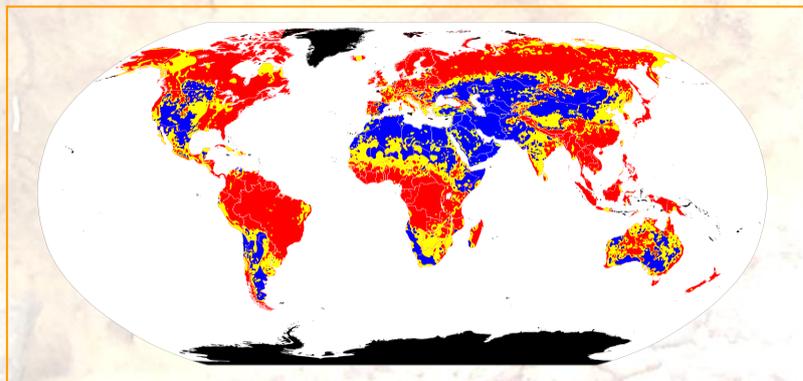
Der Kreislauf des Stickstoffs verläuft ähnlich wie der Kreislauf des Kohlenstoffs, er ist aber komplizierter und noch stärker auf Mikroorganismen angewiesen. Das chemisch sehr träge Gas Stickstoff kann im Boden von speziellen Bakterien durch enzymatische Umwandlung in Ammoniumverbindungen und Nitrate fixiert werden. Da beide wasserlöslich sind, kann der Stickstoff in dieser Form von den Pflanzen aufgenommen und in Proteine umgewandelt werden. Die leistungsfähigsten dieser Bakterien leben in Symbiose mit Leguminosen-Pflanzen, die sie mit einem Pflanzenprotein vor Oxidation schützen.

Der Stickstoff gelangt durch Ausscheidungen von Lebewesen oder zerfallende organische Reste wieder in den Boden zurück. Dort setzt eine neue Aufarbeitung durch Mikroorganismen ein, die zu gasförmigen Abbauprodukten NO_2 , NO oder N_2O (Lachgas), Ammoniak oder Stickstoff führen. Ammoniak und Stickoxide kommen dann durch Auswaschung (Regen) in den Boden zurück, was bei Lachgas jedoch eine Weile dauern kann. Der Anteil von Stickstoff (C/N-Verhältnis, das das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff angibt) liegt in Schwarzerdeböden bei 10 und sollte bei Ackerboden 25 nicht überschreiten, weil sonst eine Einschränkung der Fruchtbarkeit droht^{*8}.

Die mineralischen Nährstoffe werden in wasserlöslichen Verbindungen von den Pflanzen aufgenommen und in organische Verbindungen eingebaut. Die Kreisläufe dieser Stoffe finden ohne die Entstehung von Gasen statt. Dabei unterscheidet sich Phosphor von den übrigen Nährstoffen, weil seine Einbringung durch Düngemittel den natürlichen Umsatz mittlerweile um den Faktor 3-4 übersteigt.

Der Boden muss die Nährstoffe in leicht verfügbarer Form dauerhaft speichern. Er kann das auf zwei Arten tun:

- Durch chemische Speicherung. Die Nährstoffe sind in diesem Fall chemisch an Kohlenwasserstoffe gebunden und werden freigesetzt, wenn die Kohlenwasserstoffe bakteriell abgebaut werden (Mineralisierung).
- Durch physikalische Speicherung. Dazu werden die in Wasser gelösten Nährstoffe als Ionen an Kolloide angelagert. Kolloide sind Kleinstteilchen mit einer möglichst großen Oberfläche, Tonminerale oder Huminstoffe. Wichtig ist neben der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens auch der pH-Wert, weil er Einfluss auf die Ionenaustauschfähigkeit der Pflanzen hat. Ideal sind ein leicht saurer oder neutraler pH-Wert (5,5-6,8).



Weltkarte mit Boden-pH-Werten. Blau basisch, gelb neutral, rot sauer, schwarz keine Angaben. Quelle: Wikipedia Commons.



Die Folgen von Übernutzung sind oft schwer von den Folgen des Klimawandels zu unterscheiden. Die Erwärmung und Austrocknung des Bodens erhöhen seine Anfälligkeit. Besonders oft trifft es Weideland, hier in Lesotho. Foto: wikimedia.org

Klimawandel

Der durch die Bodenerwärmung bewirkte Abbau der Kohlenwasserstoffe trifft auch den Nährstoffkreislauf, weil organische Kohlenwasserstoffe den besten Speicher für diese Nährstoffe bilden. An Humusbestandteile gebundene Nährstoffe lösen sich nur langsam im Wasser, sind dann aber für die Pflanzen gut verfügbar, zumal Humus Wasser besser hält als anorganische Stoffe (einschließlich Ton).

Die Düngemittelindustrie hat es bis heute nicht geschafft, die Speichereigenschaften organischer Kohlenstoffsubstanzen nachzuahmen und die bis zu 70% hohe Verlustquote ihrer Nährstoffdünger entscheidend zu senken. Der beschleunigte Abbau von organischem Kohlenstoff erzeugt so eine Zusatznachfrage nach Düngemitteln, deren ungenutzter Teil in die Gewässer gespült wird und dort zu negativen biologischen Veränderungen führt.

Wenn Stickstoffabbauprodukte in die Verluste mit einbezogen sind, entstehen durch bakterielle Zersetzung zusätzliche Treibhausgase. Das wichtigste davon ist N_2O oder Lachgas, das etwa 100 Jahre in der Atmosphäre verbleibt und, weil schwerer als Luft, in der bodennahen Luft besonders angereichert wird. NO und NO_2 sind ebenfalls schwerer als Luft und unter Sonneneinstrahlung in die Entstehung des Treibhausgases Ozon (O_3) verwickelt. Ozon kann in Bodennähe zusätzlich Schäden bei Pflanzen verursachen.

Die Belastung durch NO_2 in der Luft hat in Deutschland in den letzten Jahren deutlich zugenommen, die Richtwerte wurden teilweise um das Doppelte übertroffen. Die Überdüngung ernährt die gasbildenden Bakterien nicht nur auf den Äckern, sondern auch an den Ufern und in den Überflutungszonen der Gewässer. Auch dies wird durch den Klimawandel begünstigt, denn die Bakterien sind in ihrer Aktivität wärmeabhängig.⁹



Der Klimawandel wird in Bergregionen zu verstärkten Niederschlagsereignissen führen. Um dort Landwirtschaft betreiben zu können, muss der Boden gegen Erdbeben stabilisiert werden, am besten durch Baumbewuchs.

Erdbeben in Binh Dinh, Vietnam 2013. Foto: cathrinka.blog.de

3. Strategien für den Bodenschutz

Die FAO und andere Hilfsorganisationen haben Strategien erarbeitet, die eine nachhaltigere Nutzung des Bodens ermöglichen sollen. Da die meisten davon auf die Verhältnisse in unterentwickelten Ländern zugeschnitten sind, müssen sie nicht nur den Bodenschutz verbessern, sondern auch das Einkommen und die Lebensumstände der oft extrem armen Bevölkerung. Von den Böden, die von der FAO als „degraded“ betrachtet werden, liegen die meisten in unterentwickelten Regionen. Ertragsmindernde Bodenbearbeitungsmethoden sind praktisch ausgeschlossen, wenn die Bauern von einem Einkommen von 1,25-1,5 \$ pro Tag leben müssen. Vielmehr müssen die Maßnahmen einen nachhaltigen Einkommenszuwachs ermöglichen, der dann die Grundlage für die Verbesserung der Lebensverhältnisse darstellt.

Die Armut in den von den Hilfsprogrammen anvisierten Regionen bedeutet auch, dass Investitionsmittel nur in beschränktem Maße zur Verfügung stehen. Über Entwicklungshilfemittel hinaus gibt es nur die Angebote ländlicher Kleinkreditbanken, deren horrenden Zinssätze anderswo Gegenstand von Verbraucherschutzgesetzgebung wären. Das „nährstoffarme“ Finanzambiente hat den Vorteil, dass sparsame Problemlösungen begünstigt werden. Eine Verschwendung von Wasser und Düngemitteln nach Art der Agrarindustrie in den reichen Ländern können sich arme Bauern in Entwicklungsländern nicht leisten. Die unter diesen Umständen erarbeiteten ressourcenschonenden Lösungen („climate-smart agriculture“) können im Erfolgsfall jedoch auch in den reichen Ländern angewendet werden, um die Nachhaltigkeit der Bodennutzung zu verbessern.



Dieser Bauer benötigt eine Bewässerungsanlage, einen Traktor und angemessene Arbeitsschutzkleidung. Außerdem sollte er die Kleinkreditraten für seine Zugochsen pünktlicher zahlen. Aber- wo bekommt er das Geld dafür her? Foto: kfw.de

a) Reduzierung von Stickstoffverlusten im Reisanbau durch Harnstoff-Briketts

FAO und IFDC (International Fertilizer and Development-Center) propagieren eine Methode der Stickstoffdüngung, bei der die Ausbringung von Harnstoff-Dünger nicht durch Verstreuen von Pulver oder Flüssigkeit erfolgt, sondern durch kleine 1-3 Gramm schwere Briketts, die vor dem Einpflanzen der Setzlinge 10 cm tief in den Boden gesteckt werden. Im Gegensatz zu anderen controlled-releasing fertilizers wird nicht nur die Abgabe der Nährstoffe an den Boden verlangsamt, sondern auch der Ort der Abgabe gesteuert. Diese Methode, die vom International Rice Research Institut und dem IFDC entwickelt wurde, senkt die Verluste an Harnstoff-Dünger um 40%. Sie steigert die Erträge um 25% und senkt den Harnstoff-Aufwand um den gleichen Betrag. Die Technik ist arbeitsintensiv: die Einbringung erfolgt durch Landarbeiter per Hand auf den Bepflanzungsflächen. Dazu entstehen noch Arbeitsplätze in der Produktion der Briketts. Anwendungsgebiete sind vor allem in Bangladesh und Westafrika, in China wird die Einführung geplant.

Bangladesh sparte durch die Einführung der Düngungsmethode pro Jahr 22 Mio.\$ an Einfuhrkosten für Düngemittel. und 14 Mio.\$ an Düngemittelsubventionen.

Die Düngemittelausbringung durch Brikettdünger kann im Prinzip auch für andere Nährstoffe und in anderen Bereichen der Landwirtschaft erfolgen. Die räumliche Kontrolle der Nährstoffabgabe spart nicht nur Dünger, sondern auch Herbizide, weil sie den Zugang der Unkräuter zu Nährstoffen erschwert. Das wichtigste Hemmnis für die Adaption der Technik in reichen Ländern ist der hohe Arbeitsaufwand. Düngemittel sind in Industrieländern zu billig, um eine Einsparung durch arbeitsintensive Techniken attraktiv zu machen. Theoretisch besteht natürlich die Möglichkeit, die Ausbringung der Briketts durch Maschinen vornehmen zu lassen. Bisher gibt es solche Maschinen jedoch nicht, obwohl mit Einzelkornsämaschinen die technische Basis dazu vorhanden wäre.



***Harnstoffbriketts neben Reispflanzen.
Foto: ghanavoice.com***



Wo Reissetzlinge maschinell eingepflanzt werden, könnte man auch die Harnstoff-Briketts maschinell einsetzen. Versucht hat es aber noch keiner. Foto: wikimedia commons.

b) Agroforstwirtschaft und Mischkulturen

Agroforstwirtschaft ist ein in den Mittelmeerländern und anderen warmen Regionen verbreitetes Verfahren, das durch Mischung von Baumkulturen und anderen Nutzpflanzen oder Tierhaltung verbesserte Erträge und bessere Umweltfreundlichkeit zu verbinden versucht.

Der Nutzeffekt dieser Anbaumethode ist am deutlichsten in Bergregionen, weil die Bäume dort zur Stabilisierung von Hängen beitragen. Wenn Niederschläge starken saisonalen Schwankungen unterliegen, ist die Erosionsgefahr am Ende der Trockenzeit sehr hoch, der Boden kann von einsetzendem Starkregen leicht weggeschwemmt werden. Die Baumbepflanzungen stabilisieren mit ihren Wurzeln den Boden, außerdem verringern sie schon in der Trockenzeit den Wasserverlust der Böden, da sie durch Verschattung die Sonneneinstrahlung vermindern und durch Humusbildung seine Wasserspeicherungsfähigkeit erhöhen.

Ein weiterer Vorteil von Agroforstwirtschaft ist die höhere Artenvielfalt, die sowohl die Nutzpflanzen umfasst als auch andere Pflanzen und Tiere, die im Bereich der Pflanzungen leben. Der höhere Artenreichtum erhöht die Widerstandskraft der Pflanzungen gegen Schädlinge.

Rechts: Agroforstkulturen stabilisieren Hänge in Äthiopien (Foto: voices.nationalgeographic.com). Links: in sehr wasserarmen Gebieten sind auch Mischkulturen mit Feigenkakteen möglich, hier in Sizilien. Foto: ullaegino.blogspot.com.



Der Nährstoffgehalt des Bodens kann auf vielfältige Weise erhöht werden:

- Durch Leguminosenpflanzen, die an ihren Wurzeln stickstofffixierende Bakterien begünstigen. Der Stickstoff wird dann durch abgefallene Blätter und Äste als Humusgrundlage an die anderen Pflanzen weitergegeben. Bei Hangpflanzungen kann der Stickstoff auch als gelöstes Nitrat oder Ammonium durch das Hangzugwasser an tiefer liegende Pflanzen weitergegeben werden.
- Bei Tierhaltung können die Ausscheidungen der Tiere zur Düngung beitragen.
- Da die Bäume durch ihre Wurzeln Nährstoffe aus größeren Tiefen mobilisieren können, wird durch abgefallene Pflanzenteile der Nährstoffgehalt der oberen Bodenteile erhöht. Dadurch können auch die Verluste von Dünger an das Grundwasser vermindert werden, wenn die Wurzeln der Bäume das Grundwasser erreichen.

Im Klimawandel wirkt sich die Verschattung des Bodens durch die Bäume positiv aus, weil der Boden so gekühlt wird und die Verluste an Bodenfeuchtigkeit, die durch die Erwärmung entstehen, begrenzt werden. Aus dem gleichen Grund wird die Zersetzung von organischen Kohlenstoffen verlangsamt.

Agroforstwirtschaft ist mechanisierbar, wenn der Abstand zwischen den Bäumen hoch genug ist, um die Maschinen bewegen zu können.

Da Agroforstwirtschaft arbeits- und know-how-intensiver ist als andere Anbauformen, müssen Agrarprodukte mit möglichst hoher Wertschöpfung hergestellt werden, um den erhöhten Aufwand

lohnend zu machen, z.B. zertifizierte Bioprodukte. Nachteil bei der Ausweitung dieser Anbauform ist die lange Zeit, die nötig ist, um die Bäume heranwachsen zu lassen. Solche langen Zeiträume werden von der Agrarindustrie nur dann in Kauf genommen, wenn das Erzeugnis der Bäume den Hauptzweck der Bewirtschaftung darstellt, etwa bei Obstanbau.



Die als „Dehesa“ bekannte Agroforstkultur verbindet auf nährstoffarmen Böden im Norden Spaniens und Portugals die Schweinezucht mit dem Anbau von Korkeichen. Die Dehesa-Gebiete sind Lebensraum für eine große Zahl seltener Tierarten, z.B. den Schwarzstorch. Solche Umweltvorteile können durch „payments for environmental service“ (PES) von Behörden und Hilfsorganisationen vergütet werden. Foto: turismoextremadura.com

Theoretisch könnte man den Anbau von Bäumen durch die Ausgabe von Emissionszertifikaten in den Industrieländern fördern, ein Hektar Wald kann pro Jahr etwa 13 Tonnen CO₂ als Kohlenstoff speichern^{*10}.

Fördert man einen Hektar Wald mit 500€ pro Jahr (in unterentwickelten Ländern ein bedeutender Betrag), so können bei dem aktuellen Preis von 5€ pro Emissionszertifikat Emissionszertifikate für 100 Tonnen CO₂ 13 Tonnen CO₂-Aufnahme in Bäumen finanzieren. Eine Eins-zu-Eins-Relation von emittiertem und abgebautem CO₂ ergibt sich erst bei einem Zertifikat-Preis von 38,46 €, was den Großemittenten bisher zu teuer war.



Mit der sloping agricultural land technology (SALT) können auch bereits völlig erodierte Böden wieder fruchtbar gemacht werden. Dabei werden Leguminosen-Pflanzen als erste Generation gepflanzt, deren Nährstofffixierung dann die Grundlage für die folgenden Nutzpflanzen bildet. Das Foto stammt aus den Bergregionen der Philippinen, fao.org.

Eine andere Einschränkung betrifft den Wasserhaushalt der Pflanzungen. Da Bäume mehr Wasser brauchen als andere Pflanzen, besteht die Gefahr, dass die Bäume bei Wassermangel den anderen Nutzpflanzen das Wasser wegnehmen. Um das zu vermeiden, müssen in wasserarmen Regionen tiefwurzelnende Bäume oder Palmen angebaut werden, deren Wurzeln ins Grundwasser reichen.



Diese beiden Bauern unterhalten eine Mischkultur von Pappeln und anderen Nutzpflanzen (Weizen, Mais, Zuckerrohr, Kartoffeln etc.) im indischen Bundesstaat Haryana. Das Einkommen ist mit 1700\$ per Acre für die Region sehr hoch. Die Baumpflanzungen können, wenn sie in Haryana zur Regel werden, den Fall des Grundwasserspiegels bremsen, weil Bäume die Verdunstungsverluste des Bodens verringern. Foto: wca2014.org

c) Terra Preta, Conservation Agriculture und der Schutz des Humusbodens

Vor mehr als hundert Jahren wurde in der Amazonasregion eine Bodenart entdeckt, die Ähnlichkeit mit Schwarzerdeböden hat. Sie enthält etwa 70 mal so viel organischen Kohlenstoff wie die umliegenden Ferralsole. Die organischen Bestandteile sind das Resultat menschlichen Ackerbaus, es wurden Teile des Regenwalds durch Brandrodung beseitigt und danach unter Ausnutzung von Brandrückständen als Dünger in Ackerboden verwandelt. Im Laufe der Zeit wurde immer neues organisches Material aus Pflanzenrückständen, Gülle, Fischgräten etc. in den Boden eingebracht.

Ungewöhnlich ist, dass solch ein nährstoffreicher Boden unter den Bedingungen der Tropen so lange stabil bleiben konnte. Bei der Suche nach den Ursachen macht ein Teil der Autoren die hohen Anteile von Pflanzenkohle im Boden verantwortlich. Pflanzenkohle entsteht durch Pyrolyse, wenn organische Stoffe unter Luftabschluss stark erhitzt und dadurch entwässert werden. Die Entstehung dieses Materials in dem Gebiet kann man dadurch erklären, dass die Ureinwohner Unterholz des Regenwaldes abbrannten und zur Begrenzung des Brandes die Brandherde mit Sand zuschütteten. Es entstand so durch den Luftabschluss neben Pflanzenasche auch Pflanzenkohle. Spuren von Kohlemeilern hat man nicht gefunden.

Die Vertreter der Pflanzenkohlehypothese meinen, dass Pflanzenkohle als Bodenzusatzstoff die Haltbarkeit organischer Substanzen im Boden erhöht und daher zum Vorbild ökologischer Bodenbewirtschaftung in den Tropen werden könnte. Dazu soll die Pflanzenkohle noch als Einlagerungsmittel für Kohlenstoff aus der Atmosphäre dienen, es ist die Rede von 12% der jährlichen anthropogenen Treibhausgasemissionen¹¹.

Untersucht man die Substanz der Pflanzenkohle, finden diese Vorstellungen wenig Unterstützung. Die Dauerhaftigkeit der Pflanzenkohle hängt mit ihrer Verhärtung im Pyrolyseprozess zusammen. Das bedeutet aber auch, dass eine Freisetzung der chemisch gebundenen Nährstoffe durch bakterieninduzierten Zerfall nicht stattfinden kann.

Die wichtigste Eigenschaft der Pflanzenkohle ist ihre hohe physikalische Adsorptionsfähigkeit. Sie kann in Wasser gelöste Stoffe in so hohem Maße binden, dass man sie in großem Stil als Reinigungsfilter für Trinkwasser verwendet. Das Problem: die adsorbierten Stoffe können nur in aufwendigen Reinigungsverfahren aus der Kohle entfernt werden. Das bedeutet auch, dass die Aufnahme gespeicherter Nährstoffe durch die Saugspannung von Pflanzenwurzeln unmöglich ist. Die Nährstoffe werden zwar in großer Menge gespeichert, aber sie sind für die Pflanzen nicht mehr verfügbar.

Die Anhänger von Pflanzenkohledüngung mischen in ihren Versuchen die Pflanzenkohle immer mit fruchtbarem Humus, erklären aber das Wachstum der Pflanzen mit der Anwesenheit der Pflanzenkohle. Es spricht viel dafür, dass es sich um Selbsttäuschung handelt. Negative Folgen hat die Idee mit der Pflanzenkohle dann, wenn in Entwicklungsländern Bauern dazu überredet werden, ihre Pflanzenteile in kleinen Billigöfen zu Holzkohle zu machen¹². Da sie die Pflanzenteile als Kompostdünger und Tierfutter dringend brauchen, entsteht ihnen großer Schaden, wenn das Material in nutzlose Kohle verwandelt wird. Pflanzenkohledüngung wird von keiner seriösen Hilfsorganisation empfohlen.



T.D. Lyssenko (1898-1976)

Trofim Lyssenko war ein gefürchteter Scharlatan in der Agrarbiologie der Sowjetunion. Das Potential von Pflanzenkohledüngung hat er unbeachtet gelassen. Foto: podcastscience.fm



Links: Nachdem die Ureinwohner ihre Äcker verlassen hatten, übernahm der Regenwald die Bedeckung des Terra Preta- Bodens. Er wurde so bis heute erhalten. Foto: zeitzusammen.wordpress.com. Rechts: als „Untersaat“ werden Pflanzen bezeichnet, die mit einer Hauptfrucht ausgesät werden und als Futter und/oder Gründünger genutzt werden. Der Boden wird durch Bedeckung vor Erosion geschützt und im Fall von Leguminosen (z.B. Klee- pflanzen) mit zusätzlichem Stickstoff versorgt. Die Untersaaten verringern den Bedarf an Herbiziden, weil sie den Unkräutern Nährstoffe und Wasser nehmen. Das Foto zeigt Mais mit Weidelgras, wikimedia commons.

Wenn es nicht die Pflanzenkohle ist, die den Humusboden in den Tropen überdauern lässt, welcher Faktor ist es dann? Die Anbaumethoden der Ureinwohner Amazoniens hatten gewisse Ähnlichkeit mit dem, was heute als „conservation agriculture“ bezeichnet wird. Sie nutzen pflanzliche und tierische Abfallprodukte, um damit den Boden zu düngen, wahrscheinlich war er stets durch Pflanzen und pflanzliches Material bedeckt. Eine Bodenumwendung in großem Maße war durch den Mangel an technischen Mitteln ausgeschlossen. Wenn die Brandrodung auf das Unterholz beschränkt war und die Bäume stehen gelassen wurden, ergab sich eine zusätzliche Abschirmung des Bodens durch die Baumkronen. Es gibt kaum Informationen, welche Pflanzen auf dem Terra Preta-Boden angebaut wurden, aber die Erfahrungen mit vergleichbaren Anbauformen in Afrika legt die Existenz von Fruchtwechsel nahe.

Die Bedeckung des Bodens fördert die Dauerhaftigkeit des organischen Materials, weil es gegen Sonneneinstrahlung und Erwärmung genauso geschützt wird wie gegen Erosion durch Starkregen. Dabei wird das organische Material durch bakterielle Zersetzung langsam in Humus verwandelt. Die Anbaumethoden der Amazonas-Ureinwohner sind natürlich nicht vollständig auf die moderne Landwirtschaft übertragbar, weil die Landwirtschaft im alten Amazonien eine Inselposition im Urwald hatte. Die Bauern konnten pflanzliches Material im Überfluss aus den benachbarten Waldregionen besorgen, und nur so erklärt sich die Ansammlung von organischem Material: der Abbau durch die Pflanzen war erheblich kleiner als dessen Zufuhr.

Die Grundsätze von conservation agriculture werden von der FAO empfohlen, um hochproduktive Landwirtschaft mit nachhaltiger Bodenbewirtschaftung verbinden zu können:

- so wenig Bodenumwendung (tillage) wie möglich. Das vermindert Verdunstungsverluste und den Abbau organischen Materials durch CO₂-bildende Bakterien. Die Verringerung der Bodenumwendung spart große Mengen an Arbeit.
- Der Boden muss immer mit organischem Material bedeckt sein. Soweit es sich um Pflanzenmaterial handelt, wird es durch Zerfall langsam in Kompost/Humus verwandelt. Geschützt wird der Boden aber auch durch den Pflanzenbewuchs selbst, durch Fruchtwechsel wird nicht nur die einseitige Belastung des Nährstoffhaushalts verringert, sondern auch der Zeitraum der Bedeckung durch Bewuchs verlängert („Zwischenfrüchte“). Da, wo der Wasserhaushalt es ermöglicht, können Mischkulturen mit Bäumen (z.B. Leguminosen) angebaut werden. Zwischenfrüchte und Mischkulturen können auch die Futtermittel ersetzen, die durch die für den Boden aufgesparten Pflanzenteile verloren gehen.

Nach den Prinzipien von conservation agriculture wurden 2010 117 Millionen Hektar Land bebaut, es kommen jedes Jahr etwa 6 Millionen Hektar dazu^{*13}. Beteiligt sind alle Arten von Landwirtschaft, große und kleine Betriebe, Getreide- bis Obstanbau.

d) Torfböden und Paludikulturen

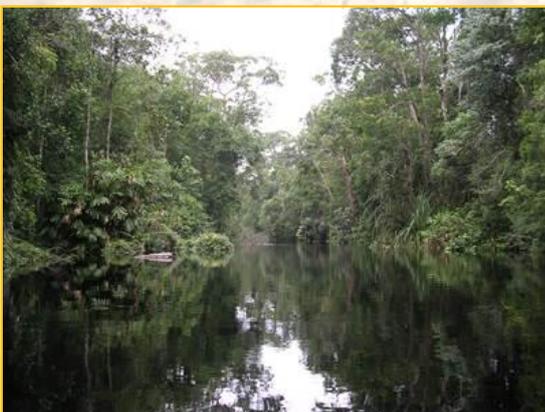
Torfböden (Histosole) entstehen in Sumpfbereichen. Es sind Stauwasserböden, deren dauernde Feuchtigkeit die Bildung saurer Hydrogencarbonat-Ionen fördert. Der niedrige pH-Wert schränkt die Aktivität der mineralisierenden Bakterien ein, so dass eine sehr kohlenstoffreiche, aber nährstoffarme und daher schwer zu bewirtschaftende Bodenart entsteht. Bei der Trocknung werden große Mengen an CO₂ freigesetzt.

Torfböden machen nur 3% des weltweiten Bodenbestands aus, enthalten aber 30% des gesamten in Böden eingelagerten Kohlenstoffs. Durch Trockenlegung von Torfböden und Waldbrände auf Torfböden entstehen 25% der durch Landwirtschaft emittierten Treibhausgase¹⁴. Das in diesen Zahlen steckende Katastrophenpotential veranlasst Klimaschützer und Agronomen zu verstärkten Anstrengungen, Nutzung und Schutz der Torfböden nachhaltig miteinander zu verbinden.



In Sumpfbereichen mit hoher Artenvielfalt sind Naturschutz und Tourismus eine lukrative Alternative zu der schwierigen landwirtschaftlichen Nutzung. Foto: tripadvisor.de.

Die Nährstoffarmut trockengelegter Torfböden führt zu hohen Ausgaben für Düngung und Kalkung. Sie werden deshalb oft nach kurzer Nutzung brach gelassen, während der CO₂ emittierende Zerfallsprozess weitergeht. Der Sumpfboden hat wegen seiner Wasseraufnahmefähigkeit wesentliche Bedeutung für niedriger liegende trockene Gebiete, er kann bei starken Regenfällen zusätzlich Wasser aufnehmen und dadurch andere Gebiete vor Überschwemmung schützen. Diese Schutzfunktion entfällt, wenn der Sumpf trockengelegt wurde. In Niederungen führt die Trockenlegung von Sümpfen zu Landabsenkungen, die die Überschwemmungsgefahr erhöhen, wenn das Land nahe an Flüssen und Meer liegt.



Ein Problem bei der wirtschaftlichen Nutzung von Sumpfbereichen ist die Verkehrserschließung. Dort, wo die Gewässer geeignet für Boote sind, ist es noch relativ einfach. Von den Verkehrsmöglichkeiten hängt auch die Versorgung der Bewohner ab: Medizin, Bildung und alles, was in einer Subsistenzökonomie nicht erzeugt werden kann. Das Ausbaggern von Kanälen kann jedoch auch die Entwässerung verstärken. Foto: wetlands.org.

Strategien zum Schutz der Torfböden beginnen mit dem Schutz der vorhandenen Torfböden vor Trockenlegung, meist durch Verbot. Der nächste Schritt ist die Wiederbefeuchtung bereits trockengelegter Sumpfbereichen, entweder durch Blockierung der Entwässerungskanäle oder durch den Bau von Kanälen zur Neubewässerung. In den Sumpfbereichen tropischer Länder gibt es Bevölkerungsgruppen, die an der Erhaltung der Sumpfbereichen großes Interesse haben, weil sie von deren Bewirtschaftung materiell abhängen und die Monokulturen, die auf dem trockengelegten Boden entstehen (z. B. Palmöl) kaum Arbeitsplätze bieten. Die Erhaltung der Sumpfbereichen wird deshalb von der lokalen Bevölkerung meistens unterstützt, während die Trockenlegung von großen Agrarkonzernen gefördert wird.

Die wichtigsten Nutzungsformen tropischer Sumpfbereiche sind Fischwirtschaft und extensive Waldnutzung, z.B. Jelutung-Gummibäume in Süd-Ost-Asien. Wichtig ist auch die in Süd-Ost-Asien indigene Sago-Palme, die auf leicht oder gar nicht entwässertem Torfboden wachsen kann. Genutzt werden Wasserpflanzen wie Wasserkastanien, Wasserspinat, Wildreis und Taro. Vorteilhaft ist dabei der gegenüber dem Torfboden größere Nährstoffgehalt des Schlammes am Grund der Gewässer.

Eine in allen Süßwassersumpfbereichen nutzbare Pflanzenform sind Wasserpflanzen als Bioenergiequelle. Wasserpflanzen (Algen, Röhricht etc.) können schneller wachsen und Nährstoffe aufnehmen als Landpflanzen. Als Grundlage für Biogasproduktion ermöglichen sie die Erzeugung umweltfreundlicher Energie, wobei die Nährstoffe in den Gärrückständen erhalten bleiben und als wertvoller Dünger verkauft werden können.

Wasserpflanzen können auch zur Reinigung biologisch belasteter Gewässer benutzt werden, was ausreichend häufige Ernte voraussetzt. Einsatzgebiete sind nicht nur überdüngte Gewässer in der Nähe intensiver Landwirtschaft, sondern auch Fischfarmen, deren erhebliche organische Abwässer ein ökologisches Problem darstellen können.



Links: der Wasserbüffel kann in Feuchtgebieten die Rolle von Hausrindern übernehmen. Als Zugtier ist er auf sumpfigen Untergrund schweren Maschinen überlegen. Foto: hamsterkiste.de. Rechts: die Wasserpest ist berüchtigt wegen ihrer hohen Wachstumsgeschwindigkeit. Für die Nutzung als Energie-, Futter und Düngerpflanze hat das Vorteile. Foto: User:PodrPro.

Die traditionelle Nutzungsform von Hochmooren ist Weidewirtschaft. Hier spielt bei der Schädigung der Torfböden wieder die Übernutzung die Hauptrolle. Um die Torfböden vor Erosion zu bewahren, müssen Nutzungseinschränkungen durchgesetzt werden, die, wenn das Terrain bereits geschädigt ist, auch zeitweilige Nutzungsverbote erfordern. Gegebenenfalls können die Nutzer Ausgleichszahlungen (payments for environmental service) für die Verringerung ihrer Tierbestände von den Behörden erhalten (z.B. im Ruoergai-Gebiet in China).

Um solche Maßnahmen zur nachhaltigen Nutzung von Mooren und Sumpfbereichen durchführen zu können, ist ein großes Maß an Koordination nötig, weil ein Fehler an einer Stelle über den Wasserverbund Einfluss auf alle Nutzer haben kann, und zwar auch auf solche, die außerhalb der Sümpfe leben und wirtschaften. Dabei darf zwischen Naturschutz und Landwirtschaft nicht polarisiert werden, denn beide sind langfristig auf intakte ökologische Kreisläufe angewiesen.



Erodierter Torfboden im Ruoergai-Gebiet im Hochland von Tibet. Die chinesische Regierung unternahm reichende Maßnahmen zur Wiederherstellung des Hochmoorgebietes, das als Weide für Yaks und Schafe genutzt wird. Es ist gleichzeitig ein Naturschutzgebiet mit zahlreichen bedrohten Arten. Foto: wetlands.org.



Die Konvektion über der Meeresoberfläche ist eine wesentliche Voraussetzung für den Transport von Wasser von den Ozeanen auf das Festland. Foto: wetter-und-klima.de

4. Der Boden und der Faktor Zeit im Klimawandel

In der Ökologie des Klimawandels hängt viel von der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Erwärmung ab: der Boden erwärmt sich schneller als die Atmosphäre und die Atmosphäre erwärmt sich schneller als die Ozeane. Die schnellere Erwärmung der Atmosphäre gegenüber dem Ozean (durchschnittlich $0,85^\circ$ Celsius der Atmosphäre gegenüber $0,6^\circ$ der Meeresoberfläche seit Beginn des 20. Jahrhunderts¹⁵) schwächt die Konvektion (d.h. das Aufsteigen erwärmter Luft) über den Meeresoberflächen. Die Konvektion ist aber eine wichtige Voraussetzung für die Verdunstung und das Aufsteigen von feuchter Luft von der Meeresoberfläche in die höheren Bereiche der Troposphäre, die dann zum Transport großer Mengen von Feuchtigkeit über die Kontinente führt. Die Konvektion unterstützt die Verdunstung, weil sie (vergleichbar einem Ventilator) die Luft über der Meeresoberfläche ständig erneuert und die Bildung von horizontalem Wind anregt. Die Stärke der Konvektion hängt ab von dem positiven Temperaturunterschied zwischen Meeresoberfläche und der Luft darüber, sie wird schwächer, wenn das Meer relativ zur Luft kälter wird. Der Klimawandel verändert fortlaufend diesen Unterschied zugunsten der Atmosphäre, da sie sich schneller erwärmt als das Meer, es wächst der Anteil der Meeresoberfläche, der kälter ist als die Luft darüber. Die Verdunstung wird geringer, obwohl die wärmer werdende Luft eigentlich mehr Feuchtigkeit aufnehmen könnte.¹⁶

Die Kombination aus verstärkter Verdunstung am Boden und schwächer werdender Verdunstung von Wasser aus den Ozeanen ist die fatalste Konstellation, die für den Klimawandel denkbar ist. Die Wasserverluste der Kontinente (Abfluss und Verdunstung) werden so nicht mehr durch Niederschläge ausgeglichen. Dabei wird der Erwärmungsvorsprung der Atmosphäre bis Ende des Jahrhunderts zunehmen, bei einer Erwärmung von $4-6^\circ$ Celsius gegenüber $2,8-4,3^\circ$ der Ozeanoberflächen¹⁷. Wie immer im Klimawandel ist die Last der Entwicklung regional ungleich verteilt, in bestimmten Regionen (etwa dort, wo das Meerwasser über 28° Celsius warm ist) können die Niederschläge auch zunehmen. In Regionen, die von dauernder Dürre betroffen sind, gibt es langfristig keine Alternative zur großindustriellen Meerwasserentsalzung. Es wird oft behauptet, dass die Meerwasserentsalzung eine schlechte Klimabilanz hat, weil sie Energie erfordert. Dieser Einwand verkennt jedoch die Dimension des Problems: die dürrebedingte Zerstörung großer Regionen durch Wassermangel erhöht den Druck auf andere Regionen, Siedlungsräume und landwirtschaftliche Produktion zur Verfügung zu stellen, die die ausgefallenen Regionen ersetzen können. Was passiert eigentlich, wenn die durch Dürre im Raum Sao Paulo geschädigten Bauern in das Amazonasgebiet auswandern, um bei besserer Wasserversorgung eine neue Existenz zu gründen?

Der Klimawandel wird diejenigen am meisten in Verlegenheit bringen, die glauben, sie könnten die Folgen der Treibhauswirtschaft auf Enkel und Urenkel abschieben. Die wichtigsten Konsequenzen des Klimawandels werden eher eintreten, als die Prognosen des IPCC es vermuten lassen. Die Illusion des „nicht heute und auch nicht morgen“ verringert in den Industrieländern die Bereitschaft, die vorhandenen technischen und finanziellen Möglichkeiten zur Treibhausgasverringerung tat-

sächlich auszunutzen, es bleibt fast immer bei theatralischen Versprechungen, die meisten davon für das Jahr 2050.

In Deutschland kann z.B. die Hälfte (500 Terawattstunden) der für Gebäudebeheizung aufgebrauchten Wärmeenergie eingespart werden, wenn die technischen Möglichkeiten für die Wärmesanierung von Altbauten vollständig ausgenutzt werden. Bringt man die verbleibenden 500 Terawattstunden durch Wärmepumpen und die Abwärme Gas und Biomasse verbrennender Heizkraftwerke auf, sind bereits 25% der in Deutschland heute verbrauchten Primärenergie eingespart. Die CO₂-Ersparnis kann auf 50% ausgebaut werden, wenn die Leistung der zusätzlichen Heizkraftwerke zum Abschalten der Kohlekraftwerke genutzt wird.

Aber dann müsste man ja Geld investieren. Nach einer Prognos-Studie sind für die vollständige Wärmesanierung der Altbauten in Deutschland 838 Mrd.€ aufzubringen, bis zum Jahr 2050 also ein Betrag von 23,94 Mrd.€ jährlich.^{*18} Obwohl nach Bekunden der Bundesregierung jährlich 55 Mrd.€ in Deutschland für Gebäudesanierung ausgegeben werden^{*19}, wird es von den Immobilienbesitzern als unrentabel betrachtet, etwas weniger als 50% davon für Wärmesanierungen der Altbauten zu bezahlen. Der Staat, der wegen seiner Versprechen für 2050 und wegen der externen Kosten des Klimawandels ein Interesse an diesen Investitionen hätte, belässt es bei Förderung durch KfW Sonderkredite und Steuerabschreibungen.

Es ist unmöglich, die Folgen solcher Unterlassungen durch geeignete Bodenbewirtschaftungsmethoden und climate-smart agriculture zum kompensieren. Es wäre schon eine große Leistung, wenn die Landwirtschaft das Rückkopplungspotential des Bodens im Kohlenstoffkreislauf entschärfen könnte. Dazu sind proaktive Investitionen notwendig, die den Wasserhaushalt und den Nährstoffbestand des Bodens schützen, bevor die Humusschicht zu abiotischem Staub zerfällt. Es hilft dem Boden auch nicht, wenn er zum Gegenstand überzogener Erwartungen über die Verfügbarkeit von Bioenergie gemacht wird. Der IPCC traut der Biomasse als Primärenergiequelle bis zu 500 Exajoule jährlich zu. Das entspricht dem gesamten Primärenergieverbrauch der Weltwirtschaft von 2008 und etwa 2,5 mal dem Brennwert der gesamten Welternte von 2011.^{*20} Solche Absurditäten belegen, wie weit die Industriegesellschaft noch von einer nachhaltigen energiewirtschaftlichen Basis entfernt ist. Die Prognose für den Boden kann unter diesen Bedingungen nicht positiv ausfallen.



Ehrenwort der deutschen Regierung: bis 2050 werden Stromproduktion und Gebäudebeheizung klimaneutral. Die Umsetzung dieses Versprechens macht Investitionen in vierstelliger Milliardenhöhe notwendig. Foto: e-technik.fh-lausitz.de

Hinweise

*1 Christian-Dietrich Schönwiese, Klimatologie, Stuttgart 1996, S.171.

*2 Schönwiese S.171

*3 Daniel Koch: Langzeitentwicklung der Bodentemperaturen in verschiedenen Naturräumen Nordrhein-Westfalens, Köln 2010, S. 47.

*4 Alan H. und Arthur N. Strahler: Physische Geographie, Stuttgart 2009, S.290

*5 Koch, S. 53.

*6 statista.de

*7 zitiert bei Koch, S49 f

*8 spektrum.de, Lexikon der Biologie

*9 Koch, S.54f.

*10 <http://www.wald.de/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/> 18.08.2015.

*11 wikipedia, Pflanzenkohle.

*12 ithaka-journal.net/biokohle-in-entwicklungslandern 18.08.2015.

*13 Food and Agriculture Organization of the United Nations: "Climate-Smart" Agriculture Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation, Rom 2010, S.5.

*14 Food and Agriculture Organization of the United Nations: Climate-Smart Agriculture Sourcebook, Rom 2013 S.51

*15 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Die Zukunft der Meere-zu warm, zu hoch, zu sauer, Berlin 2006, S. 7f.

*16 Ein wichtiger Indikator für die Nettoverdunstung der Meeresoberfläche (Verdunstung minus Niederschlag über dem Meer) ist der Salzgehalt des Wassers. Steigt er, wird die Nettoverdunstung größer, sinkt er, wird sie kleiner. Der Salzgehalt der obersten Meerwasserschicht ist in hohen und mittleren Breiten gefallen, in niedrigen Breiten jedoch gestiegen. Vierter Sachstandsbericht des IPCC, Klimaänderung 2007, Zusammenfassungen für Entscheidungsträger Bern Wien Berlin 2007, S.9.

*17 Die Zahl für die Temperaturänderung entspricht dem zur Zeit realistischsten Szenario des IPCC. Die Zahl für die Meeresoberfläche entsteht durch eine Fortschreibung des Verhältnisfaktors von 1,41 zwischen Atmosphären- und Meeresoberflächenerwärmung. Sie ist wahrscheinlich zu hoch, weil sie den Einfluss der Wärmeleitung innerhalb der obersten Meerwasserschicht vernachlässigt.

*18 wiwo.de (Wirtschaftswoche) vom 26. März 2013.

*19 Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Der Energiewende-Check, Berlin 2015, S.2.

*20 IPCC, 2011: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, S.214.