

1. BODEN UND VEGETATION: Charakterisierung und klimatische Bedeutung

Dieses Kapitel enthält eine ausführliche Einführung zu diesem Buch. Boden, Vegetation und Landnutzung werden von verschiedenen Standpunkten aus betrachtet und charakterisiert. Ganz besonders wird ihre jeweilige Bedeutung für das Klima analysiert und diskutiert. Als erstes wird die Verteilung der Böden und der Vegetation beschrieben und auf die Wechselwirkung Boden-Atmosphäre eingegangen. Der zweite Teil befasst sich ausführlich mit dem Energie- und Wasserhaushalt von Böden und ihrer klimatischen Bedeutung. Sozioökonomische Aspekte der Landnutzungsänderung, Auswirkungen auf biogeochemische Kreisläufe und Treibhausgasemissionen werden anschließend behandelt. Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen des Bodens stehen im Mittelpunkt der letzten Teile des Kapitels.

1.1 Boden und Vegetation: Definition, Verteilung und Bedeutung

JOSÉ L. LOZÁN, SIEGMAR-W. BRECKLE & HARTMUT GRASSL

Boden ist die dünne fruchtbare oberste Schicht der Erdkruste und ist daher für die Ernährung der Menschen unersetzlich. Aufgrund der gespeicherten Menge an Kohlenstoff ist der Boden für das globale Klima von sehr großer Bedeutung. Nach einer Beschreibung der Bedeutung und der Wechselwirkung Boden-Atmosphäre wird auf die Verteilung der Landfläche und Vegetation sowie auf Rodung, Artenverschiebung sowie andere Gefährdungen kurz eingegangen. Besonders ausführlich wird der Boden in Deutschland behandelt.

Soil and Vegetation: Definition, Distribution, and Importance: *Soil is the thin, fertile top layer of the earth's crust and is therefore irreplaceable for human nutrition. Due to the stored amount of carbon, the soil is of very great importance for the global climate. After a description of the meaning and interaction between soil and atmosphere, the distribution of the land area and vegetation as well as clearing, species shift and other threats are briefly discussed. The soil in Germany is treated in particular in detail.*

Suelo y vegetación: definición, distribución e importancia: *El suelo es la capa delgada superior de la corteza terrestre y por su fertilidad es la base para la alimentación humana. Debido a la cantidad de carbono almacenado, el suelo es de gran importancia para el clima global. Después de tratar su importancia e interacción entre el suelo y la atmósfera, se describe brevemente los tipos de suelos terrestre y su distribución global. También se describe la distribución de la vegetación global, los cambios en la composición de especies, así como su destrucción y otros peligros. El suelo sobre el territorio alemán es descrito con más detalles.*

Der Boden ist die belebte oberste Erdkruste. Er ist nach unten von festem oder lockerem Gestein, nach oben durch eine Vegetationsdecke bzw. die Atmosphäre begrenzt. Der Boden, die Pedosphäre, ist eingefügt zwischen Geosphäre, Biosphäre und Atmosphäre, wenige Zentimeter bis viele Meter dick, oft mit einer Schichtung, den Horizonten (Abb. 1.1-1).

Ein Boden besteht aus Mineralen unterschiedlicher Art und Größe sowie aus organischen Stoffen, dem Humus, die alle in gewisser Weise geschichtet sind und das Bodengefüge mit Poren unterschiedlicher Größe bilden. Die Poren sind mehr oder weniger mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Stoffen und Gasen) und Bodenluft gefüllt. Ein Boden weist Horizonte auf, die oben streuähnlich sind, nach unten gesteinsähnlicher werden. KUBIENA (1950) hat mit zahlreichen farbigen Bodenprofilen einen auch heute noch grundlegenden Überblick über die Systematik der Bodentypen gegeben. Die verschiedenen Bodentypen sind oft sehr charakteristisch für Ausgangsgestein, Klima und Vegetation (BRECKLE & RAFIQPOOR 2019).

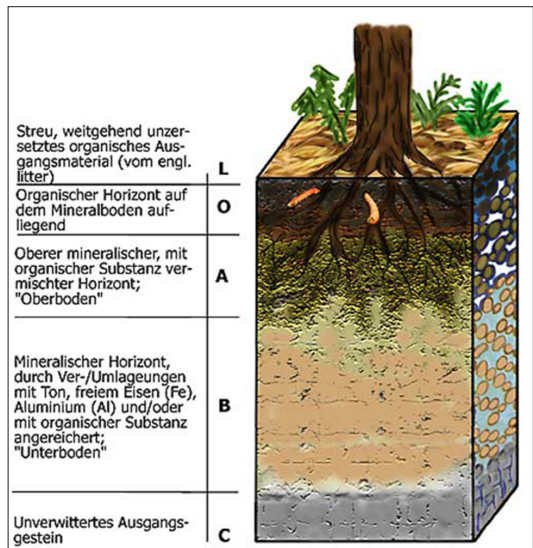


Abb. 1.1-1: Ein Boden mit seinen wichtigsten Schichtungen (Horizonten) nach Kubiena.

Boden ist ein Naturkörper, bei dem Gestein unter einem bestimmten Klima und einer bestimmten streuliefernden Vegetation durch bodenbildende Prozesse (Verwitterung, Mineralienumbildung, Zersetzung, Humifizierung, Stoffverlagerung, Verdunstung) umgewandelt wird. Bei Kulturböden kommt der Einfluss des Menschen dazu. Böden weisen sehr hohe Besiedlungsdichten mit Bakterien, Pilzen, Algen, Würmern und anderen Lebewesen auf (je m² etwa 10.000×10⁹ Bakterien, 12×10⁹ Pilze und 1×10⁹ Algen) (Abb. 1.1-2).

Ein Boden wirkt auch als Puffer gegenüber den verschiedensten Umweltweinflüssen. Böden filtern z.B. Schadstoffe und ermöglichen so die Bildung sauberen Grundwassers, werden dabei allerdings selbst belastet. Böden bilden eine der wichtigsten Grundlagen für das terrestrische Leben. Sie gehören zu den kostbarsten und schützenswertesten Naturgütern der Menschheit. Dies ist durch die Bodencharta des Europarates bereits 1972 ausdrücklich festgehalten. In 12 Punkten wurde die lebenswichtige Bedeutung des Bodens für die Menschheit definiert und Richtlinien für den Schutz, die Bewirtschaftung und die Produktivitätssicherung bzw. -steigerung der Böden entwickelt.

Kulturböden dienen vor allem der Nahrungsmittelproduktion und der Erzeugung organischer Rohstoffe. Sie bilden aber auch die Grundlage wertvollen Grüns, das Menschen Erholung spendet, Freizeitaktivitäten ermöglicht und damit unserer Gesundheit dient. Die Ertragsleistung eines Bodens als Standort für Kulturpflanzen steht häufig nicht mit seiner Ertragsfähigkeit im Einklang, weil erstere durch zahlreiche nicht bodeneigene Faktoren wie Klima, Pflanzenart, Bodenbearbeitung, Düngung, Schädlingsbefall usw. beeinflusst wird. So erbringen die sehr fruchtbaren ukrainischen Schwarzerden infolge ungünstigerer Klimabedingungen oft geringere Erträge als die weniger frucht-

baren, allerdings oft stark gedüngten Böden Mitteleuropas mit günstigeren klimatischen Voraussetzungen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2018).

Klima, Böden und Vegetation sind eng miteinander verzahnt; dies erkennt man als Ergebnis auch an der organischen Bodensubstanz, dem Humus. Er unterliegt vor allem der Aktivität der Bodenorganismen, die durch ihren Stoffwechsel laufend zum Auf-, Um- oder Abbau des Humus beitragen. Im eigentlichen Sinne ist nur der schon teilweise zersetzte organische Anteil im Boden Humus, während der unzersetzte Anteil als Detritus bezeichnet wird. Humus und Detritus bestehen zu rund 50% aus Kohlenstoff.

Je höher der Anteil an organischem Material ist, desto mehr Regenwasser wird gespeichert. Vegetation und Boden als intaktes Ökosystem sind also ein Wasserspeicher. Das Wasser wird langsam von den Pflanzen aufgenommen oder sickert ins Grundwasser. Als Wasserfilter trägt der Boden so entscheidend zum Schutz des Grundwassers bei. Die Nährstoffe können fast nur in Wasser gelöst von den Pflanzenwurzeln absorbiert werden. Organische Substanz im Boden, also Humus, bildet sich sehr langsam. Je nach Klima und Region sind viele Jahre nötig, damit einige Zentimeter Boden entstehen können. Boden ist daher ein knappes Gut. Böden können auch wie in der arktischen und subarktischen Region oder in Hochgebirgen zumindest zeitweise oder dauernd ab einer gewissen Tiefe (s.u. Permafrost) gefroren sein. In den ariden und semiariden Regionen ist der Boden frei oder teilweise frei von Vegetation; er enthält daher nur wenig organisches Material. Wie Abb. 1.1-3 zeigt, kann sich aber auch in einer sehr trockenen sandigen Wüste wie in der Secura-Wüste eine Vegetation entwickeln, wenn Wasser oder Regen ausreichend verfügbar ist, wie es während eines starken El-Niño-Ereignisses in Abständen von 3-5 Jahren der Fall ist. In der Namib-Wüste tritt dies noch seltener auf.



Abb.1.1-2: Der Regenwurm. Das bekannteste Bodentier. Wegen seiner hohen Leistung für den Stoffumsatz nimmt es eine Schlüsselstellung unter den Bodenorganismen ein. Foto: Dodo-Bird. Licensed under the Creative Commons Attribution 2.0 Generic.

Einteilung der Landfläche

Insgesamt hat die Erde eine Oberfläche von 510 Mio. km², wovon 361 Mio. km² (70,8%) mit Wasser bedeckt und 149 Mio. km² (29,2%) Landmasse sind. Ohne die eisbedeckte Fläche (Grönland und Antarktis sowie Gebirgsgletscher) steht nach IPCC (2019) nur eine Landfläche von 130,4 Mio. km² zur Verfügung (Tab. 1.1-1).

Etwa 71% der verfügbaren gesamten Landfläche werden zurzeit genutzt. Nach ERB et al. (2016) wurde auf etwa einem Drittel dieser Fläche die natürliche Vegetation z.B. durch Waldvernichtung in landwirtschaftliche Nutzfläche umgewandelt. Rund 60% des genutzten Lands stellen Weiden und Wiesen sowie Wirtschaftswälder dar. Die für die Fleischproduktion verwendete Flä-

che ist erheblich und schließt die gesamte Weidefläche und etwa 1/5 der Ackerfläche ein, die zur Futtermittelproduktion verwendet wird (FOLEY et al. 2011). Weltweit werden 70% der Wälder (Sekundärwälder) unterschiedlich intensiv bewirtschaftet (Land-Management) (ERB et al. 2016, 2017). Über 80% der Grasländer inkl. Feuchtgebiete (s. Kap. 3.4, 3.6 und 3.7) werden bereits genutzt. Die Angaben über die Flächen sind allerdings aufgrund unterschiedlicher Definitionen und Quantifizierungs-Methoden mit Unsicherheiten behaftet. So gibt die FAO (2020) für alle Wälder 40,6 Mio. km² (Tab. 1.1-2) an. Für alle Weiden inkl. Feuchtgebiete findet man in der Literatur Angaben zwischen 40 und 62 Mio. km².

Infrastrukturen (Städte, Siedlungen, Verkehrswege, Bergbau u.a.) nehmen nur eine relativ geringe Fläche von 1,4 Mio. km² (weltweit 1%) ein (IPCC 2019). Allerdings wachsen Städte aufgrund der Landflucht und wirken wie um sich greifende »Kraken« gegenüber den Vororten und dem Umland. Im Jahr 2018 gab es 33 Megastädte (>10 Mio. Einwohner). 2030 sollen es bereits 43 sein. In Deutschland beträgt die Infrastrukturfläche bereits 13%.

Tab.1.1-2: Veränderung der Waldfläche (Urwälder und Forste) nach Kontinenten 1990-2020 (aus FAO 2020).

(in Mio. km ²)	1990	2020
Afrika	7.42	6.36
Asien	5.85	6.23
Europa (ohne Russische Federation)	9.94	10.17
Nord- & Zentralamerika	7.55	7.53
Ozeanien	1.85	1.85
Südamerika	9.74	8.44
Welt	42.36	40.59

Bedeutung der Böden für das Klima

Nach IPCC (2000) enthält der Boden weltweit bis in 1 m Tiefe gerechnet 2011 Gt C. Das ist fast doppelt so viel Kohlenstoff (C), wie in der Atmosphäre (850 Gt C) und der Vegetation (466 Gt C) zusammen enthalten ist. Damit ist der Boden nach den Weltmeeren, die über 35.000 Gt C enthalten, der zweitgrößte der vergleichsweise rasch miteinander Kohlenstoff austauschenden Kohlenstoffspeicher auf der Erde. Die Erdkruste enthält noch weit mehr Kohlenstoff als der Ozean und die Böden, aber diese Kohlenstoffverbindungen werden durch

Gesamte eisfreie Landfläche 130,4 Mio,km ²	%
Infrastrukturen (Städte, Verkehrswege, Bergbau u.a.)	1
Bewässerte Anbaufläche	2
Unbewässerte Anbaufläche	10
Intensive Weidefläche	2
Genutzte Savannen und Buschland	16
Extensive Weidefläche	19
Plantagenwälder	2
Wirtschaftswälder	20
Unbewaldete Ökosysteme mit minimaler Landnutzung & Feuchtgebiete	7
Wälder (Intakt oder primär) mit minimaler Landnutzung	9
Andere Fläche (kahl, Fels, Wüste)	12
	100

Tab. 1.1-1: Verteilung der genutzten und ungenutzten Böden weltweit (nach IPCC 2019).

*Als Landnutzung wird die Inanspruchnahme von Böden und Landflächen durch den Menschen bezeichnet.



Abb. 1.1-3: Sechura-Wüste (Nordwest-Peru). Normalerweise fällt dort kaum Regen und der Boden ist daher extrem trocken (links). Erst wenn sich ein sehr starkes El-Niño-Phänomen ereignet, wie 1982 und 1998, regnet es dort genug und die Wüste verwandelt sich in kurzer Zeit in eine grüne Landschaft (rechts). Dies zeigt das Potenzial eines ariden Bodens zur Kohlenstoffbindung bei günstigen Bedingungen (Fotos: H. Cordova, PUCP, Lima-Peru).

natürliche Vorgänge nur in Jahrtausenden in wesentlicher Menge in andere Kohlenstoffspeicher überführt. Es sei denn, wir entnehmen wie seit der Industrialisierung hochkonzentrierte Kohlenstoffspeicher Kohle, Erdöl und Erdgas ebenso wie auch Kalkgestein aus der Erdkruste.

Der Boden beeinflusst durch Aufnahme oder Abgabe von CO₂ den CO₂-Gehalt der Atmosphäre. In einem intakten Ökosystem erhöht sich allmählich der C-Gehalt im Boden durch die Streu der Vegetation; so gelangt aus der Luft Kohlenstoff und Stickstoff in den Boden. Bei anhaltender hoher Bodenfeuchte steigt der C-Gehalt deutlich (Abb. 1.1-4). Umgekehrt führt die Trockenlegung, z.B. von natürlichen Mooren für landwirtschaftliche Nutzungen, zu einer Freisetzung des im Boden gebundenen Kohlenstoffs (Abb. 1.1-4). Die Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft (Ackerbau und Viehzucht) liegen mit 60,4 Mio. t CO₂-Äq. bei 8,9% an den Gesamtemissionen etwa gleich hoch wie die der prozessbedingten Emissionen der Industrie 7,9% (58,2 Mio. t. CO₂-Äq.) (UBA 2020). Wiederkauende Rinder, Mist- und Güllelagerung sowie stark gedüngte Felder setzen die klimarelevanten Gase Methan und Lachgas, aber auch Ammoniak frei. Den Hauptanteil der Emissionen innerhalb des Landwirtschaftssektors machen die Methan-Emissionen mit 51,2% aus. Die Lachgas-Emissionen durch die Ausbringung von mineralischen und organischen Düngern betragen 44,2% und die Kohlendioxid-Emissionen bilden mit 4,6% den kleinsten Anteil. Emissionen, die beim Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen oder durch das Heizen von Ställen anfallen, sind in diesen Zahlen nicht enthalten; sie werden dem Energiebereich zugerechnet (s. Kap. 6.7).

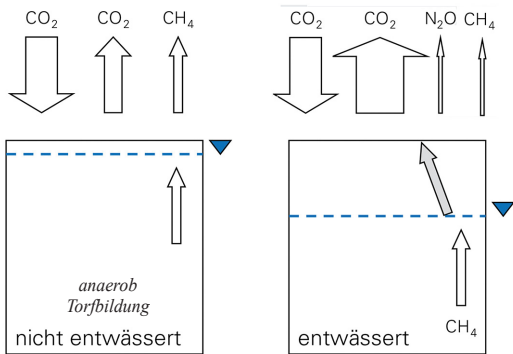


Abb. 1.1-4: Emissionen klimarelevanter Spurengase aus nicht entwässerten (links) und entwässerten Moorböden (rechts). Die blau gestrichelte Linie zeigt den Wasserstand; der graue Pfeil steht für die Umwandlung des unter anaeroben Verhältnissen gebildeten Methans zu CO₂. Links: Durch die Torfbildung wird der Atmosphäre dauerhaft CO₂ entzogen. Durch zu viele abgestorbene Pflanzen entstehen anaerobe Bedingungen – Der Abbau wird gehemmt. Dadurch stellen vernässte Moore kontinuierliche CO₂-Senke dar. Durch Entwässerung und Nutzung wird der gespeicherte Kohlenstoff im Boden wieder freigesetzt (aus TREPEL 2018).

Wissenschaftler zeigen derzeit experimentell und mithilfe von Modellen, dass Böden z.B. in ariden und semiariden Gebieten, die nur einen geringen C-Gehalt aufweisen, durch gezielte Maßnahmen zusätzlich Kohlenstoff aufgenommen und durch Humusbildung im Boden Kohlenstoff langfristig eingebaut werden könnte. Das haben Moore seit Jahrtausenden geleistet. Damit und durch Renaturierung entwässerter Moore könnte man einen Beitrag gegen den fortschreitenden Klimawandel leisten. Das notwendige Wasser kann z.B. durch verbessertes Gewässermanagement oder durch Entsalzung von Meerwasser mit Solarenergie gewonnen werden (s. Kap. 7.8). Ähnlich positive C-Sequestrierung erreicht die Landwirtschaft in ariden Gebieten wie in Libyen, Tunesien und Algerien bei Verwendung von Grundwasser oder z.B. in China mit Umleitung von Flusswasser in semiaride Gebiete.

Eine weitere, wichtige Funktion des mit Vegetation bedeckten Bodens ist die Kühlleistung. Sie basiert auf der Wasserverdunstung durch Pflanzen (Transpiration) und Bodenoberflächen (Evaporation), wobei die dafür erforderliche Energie der Umgebung entzogen wird, was eine Abkühlung zur Folge hat. Wasserverdunstung trägt damit wesentlich zur Kühlung in der unteren Atmosphäre bei. Die Wasserspeicherkapazität des Bodens ist stark vom Bodentyp abhängig und steigt mit wachsendem Humus-Gehalt. Böden mit hohen Sand- oder Grobbodenanteilen haben aufgrund der verminderten Wasserspeicherkapazität ein geringeres Kühlungspotenzial. Der Bodentyp hat einen großen Einfluss nicht nur auf die Höhe der Verdunstung, sondern auch auf den Anteil des Niederschlags, der in das Grundwasser versickert.

Die Wirkungen des Klimawandels auf den Boden sind vielfältig. Mit Erwärmung der Lufttemperatur nimmt auch die Bodentemperatur zu (Abb. 1.1-5). Dadurch werden die chemischen und biologischen Prozesse im Boden beschleunigt und auch die Zusammensetzung der Mikroorganismen beeinflusst. Die Pflanzen

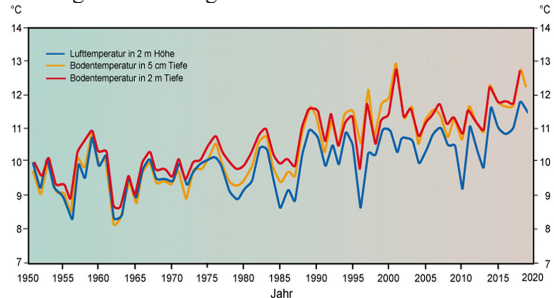


Abb. 1.1-5: Boden- und Lufttemperaturen (°C) in 5 cm und 50 cm Tiefe und an der Luft (2 m Höhe) an der DWD-Station in Essen-Bredenezy (NRW) für die Jahre 1951-2019. Daten: Lanuv NRW (<https://www.lanuv.nrw.de/kfm-indikatoren/index.php?indikator=11&aufzu=4&mode=indi>).

an der Bodenoberfläche wachsen rascher und die Dauer der Vegetationsperiode ist länger. Ein wichtiger Faktor sind die Niederschläge. Die Bodenwasserzufuhr in gemäßigten Breiten wird mit dem Klimawandel unbeständiger. Sie zeigt langfristig einen ansteigenden Trend. Aber bei gleichzeitigem Anstieg der Häufigkeit von Starkregen-Ereignissen und Dürreperioden verstärkt sich die Erosion und damit der Verlust von Bodennährstoffen (s. Kap. 3.2).

Eine besondere Stellung im Klimageschehen nehmen die gefrorenen Böden ein. Jeden Untergrund, dessen Temperatur kontinuierlich für mindestens zwei Jahre bei oder unter 0°C liegt, bezeichnet man als Permafrostboden. Solche Böden kommen in arktischen und subarktischen Regionen Kanadas und Russlands (Ostsibirien), aber auch in China und in Hochgebirgen wie in den Alpen und dem Hochland von Tibet vor. Man schätzt die Fläche der terrestrischen Permafrostböden auf weltweit 22,8 Mio. km². Permafrost ist bei langfristig extrem niedrigen Temperaturen entstanden (s. Kap.3.5). Der Boden ist stark und tief gefroren; nur eine dünne Schicht an der Oberfläche taut im Sommer auf (Auftau- oder aktive Schicht), gefriert aber im Winter wieder. Das Wasser der Auftauschicht ist für die dort vorkommende Waldvegetation ausreichend (s. Kap. 2.2). Anhand von Modellrechnungen wird bis zum Jahr 2035 eine substantielle Degradation des oberflächennahen Permafrosts und eine Vertiefung der Auftauschicht in den Sommermonaten prognostiziert. Damit wird sich auch das Verhalten des organischen Kohlenstoffs in den gefrorenen Böden ändern. Während des Sommers wird organische Substanz in der Auftauzone mikrobiell abgebaut und kann zu einer verstärkten Methanfreisetzung aus Tundrenböden und in Hochgebirgen und zu einer Instabilität des Bodens führen. Außerdem liegt tief in Permafrostböden Methan oft in großen Mengen gespeichert in fester Form vor. Methan hat pro Masseneinheit ein um 25× höheres Klimaerwärmungspotential als CO₂ (SCHIRRMESTER & HUBBERTEN 2014) (s. Kap.3.5).

Eine weitere klimatisch wichtige Eigenschaft von Landoberflächen ist das Rückstrahlvermögen (Albedo). Die Albedo gibt das Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Strahlungsfluss der Sonne an und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je kleiner der Wert ist, umso größer ist die Absorption von Sonnenenergie, desto stärker erwärmt sich eine Landoberfläche. Da nicht alle pflanzlichen Bodenbedeckungen den gleichen Albedo-Wert haben, ist es wichtig, zwischen der Vegetationsbedeckung, also Wiesen, tropischen Regenwäldern, gemäßigten Wäldern und borealen Wäldern (Taiga), Steppen und Wüsten, zu unterscheiden. Ober-

flächen mit hoher Albedo sehen von der Vogelperspektive heller aus als Flächen mit niedrigen Albedo-Werten. So haben Graslandschaften eine höhere Albedo als Wälder, ihre Erwärmung ist schwächer. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass Wälder über ihre Blätter/Nadeln aufgrund ihrer tiefen Wurzeln und ihrer voluminösen Baumkronen sowie ihrer größeren Blattfläche pro Oberfläche mehr verdunsten als die Gräser mit flachen Wurzeln. Daher ist der Kühleffekt der Wälder meist größer. Welcher Effekt der stärkere ist, hängt aber auch von anderen Faktoren wie Wasserverfügbarkeit und Sonnenstrahlung ab. Der Beitrag der Pflanzendecke bei der Gestaltung des lokalen Klimas, aber auch überregional ist folglich wesentlich.

Generell nehmen junge Wälder stark CO₂ auf, weil in diesem Wachstumsstadium die Photosynthese stärker ist als die Veratmung von CO₂ durch die Biomasse und den Boden. Dies ist seit langem bekannt; reichen Wälder ein bestimmtes Alter, steigt ihre Trockensubstanzproduktion pro Fläche nicht mehr weiter an (MÖLLER et al.1954). Die Kohlenstoffsенke wirkt nicht mehr. Der Alterseffekt macht rund 25% der CO₂-Aufnahme der Wälder aus. Das trifft vor allem auf die Wälder mittlerer und hoher Breiten zu (PUGH et al. 2019). Dazu gehören beispielsweise wieder aufgeforstete Landflächen in den östlichen Bundesstaaten der USA, die Siedler bis Ende des 19. Jahrhunderts als Ackerland nutzten, oder Wälder in Kanada, Russland und Europa, die beispielsweise durch Waldbrände zerstört wurden. Aber auch große Aufforstungsprogramme in China leisten einen Beitrag zu dieser Kohlenstoffsенke. Das Global Carbon Project kommt zu dem Schluss, dass die zusätzliche Speicherung von Kohlenstoff in der Vegetation und den Böden trotz aller weitergehenden Waldvernichtung in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen hat, von 1,3 GtC/Jahr in den 1960er Jahren auf 3,4 GtC/Jahr in den 2010er Jahren (Abb.1.1-6). Diese Aussage steht in Einklang mit der Beobachtung, dass die Vegetation in den letzten drei Jahrzehnten in vielen Regionen der Erde „ergrünt“ ist. Die ebenfalls beobachtete »Braunfärbung« der Vegetation ist global gesehen weit weniger großflächig (Kap.3.11). Die CO₂-Senke an Land hat seit 1900 zugenommen und hat dafür gesorgt, dass die globale Temperatur seit 1982 um 0,1 °C weniger zugenommen hat. Ein wichtiger Faktor ist der CO₂-Düngungseffekt.

Bedeutung der Böden für die Ernährung

Der Boden ist die wichtigste Ressource und Grundlage für rund 90% der weltweiten Nahrungsmittel- und Viehfutterproduktion und damit für unsere tägliche Ernährung unersetzlich. In den vergangenen Jahrzehnten sind große Ackerflächen durch nicht nachhaltige Nutzung bereits

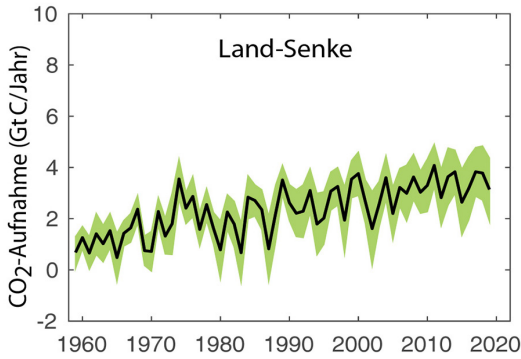


Abb.1.1-6: Zunahme der CO₂-Senke an Land (nach FRIEDLINGSSTEIN et al. 2020) (siehe auch Abb. 4.4-4).

unbrauchbar geworden. Die Ernährung für Milliarden von Menschen vor allem in armen Ländern ist durch Land- und Bodendegradation bereits heute in Gefahr. Bis 2050 wird die Weltbevölkerung auf etwa 9 bis 10 Mrd. Menschen anwachsen und der Bedarf an Lebensmitteln wird weiter steigen. Die zukünftigen Herausforderungen nehmen zu. Daher sind innovative und effektive Strukturen erforderlich, um nachhaltige Landnutzungspraktiken zu stärken (UBA 2015). Der Schutz des Bodens und eine nachhaltige Bodennutzung sichern nicht nur unsere heutige Ernährung und die der zukünftigen Generationen, sondern sie bedeuten ebenfalls Klimaschutz.

Veränderung der Bodenbedeckung

Steppen und Prärien, tropische Grasländer und offene Savannen sowie Halbwüsten nehmen eine Fläche von 57,4 Mio. km² und alle Wälder 40,1 Mio. km² ein. Insgesamt machen die Weiden (inkl. Feuchtgebiete) und Wälder zusammen über 2/3 der gesamten Landfläche weltweit aus. Weideland ist in erster Linie Grasland, mit mehr oder weniger Grasanteil (Süßgräser), das zur Fleischproduktion genutzt wird. Zu den Weidetieren gehören meist Huftiere wie Rind, Schaf, Ziege Pferd und Schwein, aber auch Geflügel. Grasländer überwiegen in Regionen, in denen Bäume infolge Wasserknappheit nicht mehr gedeihen können; in den Tropen ist dies, auch abhängig vom Jahresgang, bei unter 500mm Jahresniederschlag der Fall, in gemäßigten und kühlen Steppen bei wesentlich niedrigerem Jahresniederschlag. Weltweit gibt es viele große Landflächen, die von solchen, fast baumlosen Grünlandschaften dominiert werden. Hierzu gehören z.B. die Prärien Nordamerikas, die Pampa Argentiniens, die Graslandschaften Australiens sowie die eurasischen Steppen und die asiatischen Hochgebirge in Anatolien oder Tibet, aber auch Halbwüsten mit Zwergsträuchern in Mittel- und Zentralasien oder im Mittleren Westen der USA (BRECKLE & RAFIGPOOR 2019).

Vor rund 8.000 Jahren gab es nach der Ausdehnung der Waldflächen, weltweit etwa 60 Mio. km² Wälder. Heute beträgt die Waldfläche nur etwas mehr als 40 Mio. km² mit einem großen Anteil an Wirtschaftswäldern (28,1 Mio. km²) (Tab. 1.1-1). Viele Naturwälder werden geringfügig auch wirtschaftlich genutzt. Naturwälder (Primärwälder) findet man heute nur noch in den borealen Nadelwäldern (Taiga) und in den tropischen Regenwäldern. Sie sind gegenwärtig die größten Waldkomplexe der Erde. In großen Gebieten der sibirischen und kanadischen Taiga wird jedoch seit 3-4 Jahrzehnten zunehmend ein gewaltiger Raubbau betrieben (BRECKLE 2021). Ähnlich negative Beobachtungen werden in den tropischen Regenwäldern z.B. in Amazonien für den Anbau von Sojabohnen (Brasilien) und Südostasien für Plantagen von Ölpalmen registriert. Neben dem Raubbau sind die häufiger gewordenen Brände die größten Gefahren für die Wälder. Der FAO (2020) zufolge, nahmen die Wälder in den letzten 30 Jahren von 42,36 Mio. km² (1990) auf 40,59 Mio. km² (2020) ab. Die größte Waldvernichtung war in dieser Zeit in den Regenwäldern Südamerikas und Afrikas zu verzeichnen (Tab. 1.1-3), aber auch in Indonesien sind die Waldverluste erschreckend. Umgekehrt wird bei den Wirtschaftswäldern (in Europa) eine Zunahme der Fläche registriert, ganz erheblich ebenso durch Aufforstungen in China (s. Kap. 7.5). Allerdings werden damit die Verluste in den Tropen bei weitem nicht ausgeglichen.

Regenwälder, dazu zählen auch manche Monsunwälder, gibt es sowohl in Regionen mit gemäßigttem Klima, die sich in Australien, Neuseeland, Ostasien, Aserbaidschan, Südküste, an der Westküste der USA und Kanadas sowie im Iran, in der Türkei und Georgien finden, als auch in Gebieten mit tropischem Klima, wie sie in Mittel- und Südamerika, Afrika inkl. Madagaskar, Süd- und Südostasien, Australien sowie Ozeanien anzutreffen sind. Die drei größten tropischen Regenwaldregionen sind Amazonien in Südamerika,

Tab.1.1-3: Ursprüngliche, neusteinzeitliche (Neolithikum) Waldzusammensetzung (in %) im Vergleich zu heute in Deutschland (Quellen: WALTER & STRAKA 1970, BMEL 2021a,b).

	Ursprünglich	1927	2020
Laubholz	81	66	44
Nadelholz	19	34	56
Buche	36	38	16
Eichen	32	20	10
Erle	6	2.5	10*
Anderer Laubbäume	7	5.5	8**
Kiefer	13	20	23
Fichte	3	7	26
Tanne u.a.	3	7	7***

*Erle, Birke, Pappel **Ahorn, Esche, Linde u.a. ***Tanne, Lärche & Douglasie

das Kongo-Becken in Afrika und Südost-Asien, dazu Ozeanien. Während das Klima in gemäßigten Regionen jahreszeitlichen Temperaturunterschieden unterliegt, ist das Klima in den Inneren Tropen während des ganzen Jahres relativ konstant ($>18^{\circ}\text{C}$ bis 2.000 m Höhe, und meist >1.600 mm Jahresniederschlag mit zwei leichten Maxima, aber fast ganzjährig feucht). Die dort herrschende Vegetationsform ist der immergrüne Laubwald (Hyläa). Die Verbreitung der tropischen Regenwälder ist auf einen Streifen beiderseits des Äquators ungefähr zwischen 10°N und 10°S beschränkt. Bei Lagen über 2.000 m Höhe spricht man vom Berg-Regenwald.

Etwas weiter vom Äquator entfernt zeigt die Temperatur schon einen leichten Jahresgang, die Niederschläge über das Jahr werden ungleichmäßiger, und es gibt dort oft ein ausgeprägtes Sommerregnumaximum, dafür aber in der kühleren Jahreszeit eine ein- bis mehrmonatige ausgeprägte Trockenzeit. Dies führt dazu, dass die Wälder teilweise laubabwerfend werden (halb-immergrüne oder saisonale Regenwälder) und schließlich bei mehrmonatiger Trockenzeit im Jahr Savannen überwiegen.

Boreale Nadelwälder haben ihre Verbreitung ausschließlich auf der Nordhalbkugel bis 71°N . Sie gehen polwärts in die Zone der Waldtundra über. Sie liegen in Nordeuropa, Asien (Sibirien und Mongolei) sowie Nordamerika (Kanada und Alaska). Auf der Südhalbkugel fehlt diese Vegetationszone völlig, da die Landmasse mit entsprechendem Klima nicht vorhanden ist. Es handelt sich dabei um Wälder, die nur aus vier Nadelholz-Gattungen: Fichten, Kiefern, Tannen und Lärchen bestehen. Diese Gebiete werden in den Niederungen von baumarmen Mooren durchzogen (s. Kap. 4.5). Bedingt durch einen höheren Biomassenzuwachs bei höherem CO_2 -Gehalt speichern diese Wälder zurzeit in der Vegetation und den Böden mehr Kohlenstoff.

Veränderung der Artenzusammensetzung in den Wäldern

Seit der Jungsteinzeit wurden die Wälder Europas bezüglich Ausdehnung und Artenzusammensetzung gravierend verändert. Pollen-Untersuchungen ergaben, dass die Wälder um 2.750 v. Chr. vor allem in Nordwestdeutschland meist aus Laubbäumen wie Eichen, Buchen, Erlen, Linden, Hasel, Ulmen und Eschen bestanden. Nadelbäume wie Kiefern waren eher im Flachland Nordostdeutschlands und im Alpenvorland sowie im Mittelgebirge etwas häufiger (Abb. 1.1-7). Mit dem Bevölkerungswachstum wurden die Wälder durch Brandrodung gelichtet. Die domestizierten Tiere wurden mangels Weiden mit Blättern von Linden, Eschen und Ulmen gefüttert. Etwa 4.000 v. Chr. begann die Landwirtschaft kleinflächig mit einem

Gartenbau ähnlichen Anbau. Später in der Bronzezeit (2200-800 v.Chr.) gewann die Agrarwirtschaft langsam an Bedeutung. Ein einfacher Feldbau war bereits 40-50 ha groß. Vor der Römerzeit (ab 50 v. Chr.) hatten die Äcker oft bereits eine Fläche von weit über 100 ha. Mit der technischen Entwicklung im Mittelalter (500-1500) und der Bevölkerungszunahme wurde die Landwirtschaft stark intensiviert. Der Nahrungsbedarf wurde durch die lokale Produktion gedeckt, da es noch keinen überregionalen Transport von Agrarprodukten gab. Gleichzeitig dienten die Wälder der immer intensiveren Holzbeschaffung für Brenn- und Baumaterial. Die Bauern trieben ihre zahlreicher gewordenen Nutztiere wie Rinder, Pferde, Schafe und Ziegen sowie Schweine in die Wälder; sie fraßen die Jungbäume und vernichteten dadurch den Nachwuchs für den Wald. 4000 v. Chr. war Europa noch zu etwa 90% mit Wäldern bedeckt. Ende des Mittelalters herrschte bereits Holz-mangel. Die Waldfläche in Deutschland betrug weniger als 15%. Diese Angabe ist allerdings mit großer Unsicherheit behaftet. Auch aus Pollen-Untersuchungen ist es schwierig, eine Zahl abzuleiten. Die schlechte Lage bei den Wäldern führte dazu, dass man mit der Aufforstung von Ödland begann. Diese ersten Aufforstungen der Sandböden um Nürnberg mit Kiefern im Jahre 1368 sind der Anfang der Forstwirtschaft.

Später erholten sich die Wälder weiter begünstigt durch die in dieser Zeit herrschende klimatische Ungunst (Kleine Eiszeit). Es gab eine Hungersnot und eine große Auswanderungswelle aus Europa - vor allem nach Amerika. Die drastische Reduktion der Bevölkerung in Europa führte auch zur einer Verödung großer landwirtschaftlicher Flächen. Das bewirkte gleichzeitig eine Erholung der Wälder. Erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts setzte, verursacht durch die immer noch enorme Holzknappheit, der Hochwaldbetrieb richtig ein. Im Jahre 1850 betrug die Waldfläche nach ROBERTS et al. (2018) bereits wieder 40%.

Man schätzt, dass insgesamt 1/3 des heutigen zusätzlichen Kohlendioxids in der Atmosphäre aus historischen Waldvernichtungen und Landnutzungsänderungen stammt.

Die negative Entwicklung der Wälder war nicht durchgehend. Pandemien und Kriege, die mehrere Jahrzehnte dauerten und zu drastischen Reduktionen der Bevölkerung in Europa führten, haben eine Verödung großer landwirtschaftlicher Flächen zur Folge gehabt. Das bewirkte gleichzeitig eine Erholung der Wälder. Zu diesen Ereignissen gehört z.B. die Justinianische Pest (541-770), die über 200 Jahre andauerte. Ähnlich einschneidend waren die Pest-Epidemien während des Dreißigjährigen Krieges (1618-1648) in Europa.

Tab. 1.1-3 zeigt die Zusammensetzung der ursprünglichen Wälder im Vergleich zu 1927 und heute. Sie bestanden in Deutschland zu 4/5 aus Laub- und 1/5 aus Nadelbäumen. Die 2. Spalte zeigt die Zusammensetzung im Jahre 1927 (WALTER & STRAKA 1970). Die 1/3 Nadel- und nur 2/3 Laubbäume kamen zustande, weil Eichenwälder aufgrund ihrer besseren Bodenqualität im Laufe der Zeit bevorzugt gerodet wurden. Der Anteil der Buche verharrete etwa auf dem vorherigen Niveau. Die Nadelbaumwälder hingegen blieben aufgrund ihrer schlechten Böden, der höheren Gebirgslage oder anderer ungünstiger Lagebedingungen vom Ackerbau verschont. Ihr Anteil nahm daher (in der 2. Spalte) zu. Die Zunahme der Nadelbäume (in der 3. Spalte) ist die Folge der Forstwirtschaft. Die schnell wachsenden Fichten und Kiefern wurden Buchen und Eichen vorgezogen. So wurden z.B. Buchen-Fichten-Tannen-Wälder in buchenarme Fichten-Tannen-Wälder umgewandelt. In den letzten Jahren ist der Anteil der Laubbäume den

Bundeswaldinventuren zufolge im Jahr 2020 trotz einer Erholung geringer als im Jahr 1927. Zurzeit bestehen die Wälder in Deutschland zu 55% aus Nadelbäumen und zu 45% aus Laubbäumen. Der Waldzustand zeigt seit Beginn der Erhebung im Jahr 1984 einen negativen Trend. Der Bericht für 2020 besagt, dass die mittlere Kronenverlichtung aller Baumarten mit 26,5% so hoch wie noch nie ist. Nur noch 21% aller Bäume weisen keine Kronenverlichtungen auf. Ferner wird eine stark zunehmende Absterberate vor allem bei den älteren Bäumen über 60 Jahre beobachtet (THÜNEN 2021). Aber auch die jüngeren Bäume zeigen einen negativen Trend. Der Anteil der mittleren Kronenverlichtungen bei den Laubbäumen ist besonders bei der Buche stark angestiegen. Die lange Dürre 2018-2020 hat die o.g. Entwicklung verstärkt. Bei den Nadelbäumen leidet besonders die Fichte unter der Erwärmung und Trockenheit der letzten Jahre. Hinzu kommen die Schäden durch die klimabedingte Massenvermehrung des Bor-

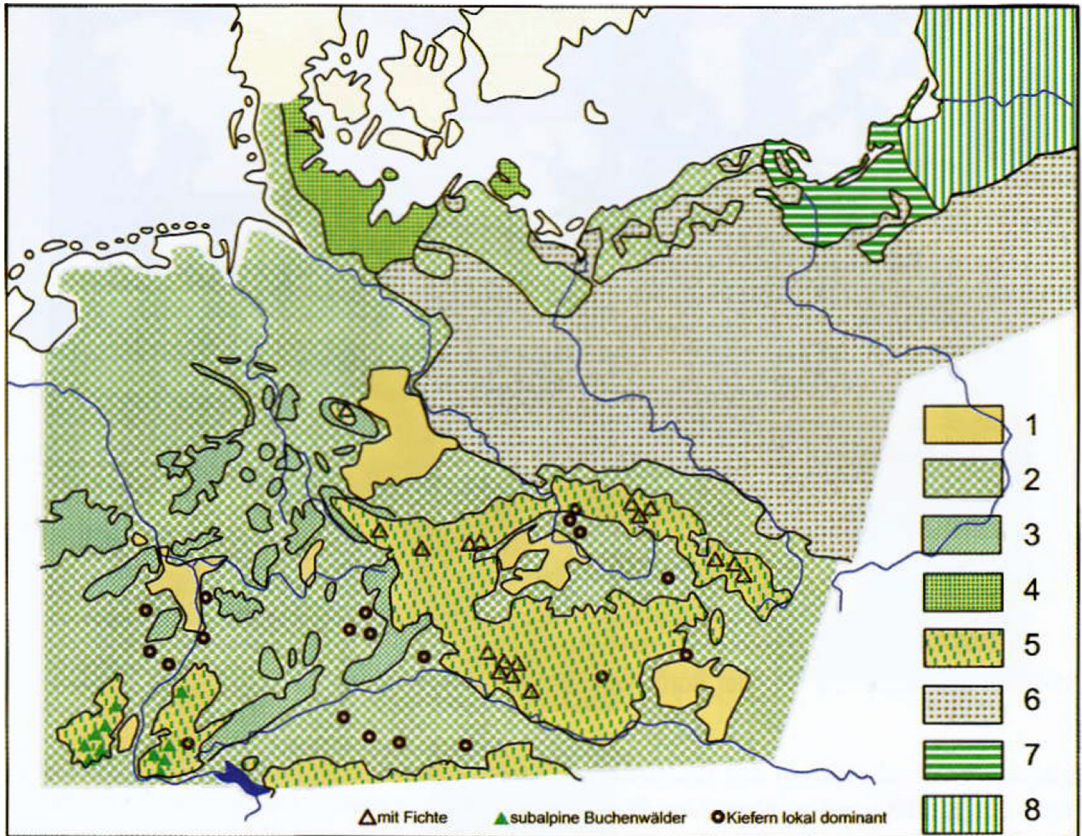


Abb. 1.1-7: Zusammensetzung der natürlichen Wälder Mitteleuropas vor Beginn der historischen Zeit nach pollenanalytischen Untersuchungen, entworfen von F. Firbas 1949 (aus BRECKLE et al. 2021, WALTER & STRAKA 1970). 1: Trockengebiete (Jahresniederschlag <500 mm) mit Eichenmischwäldern (ohne Buche). 2: Buchenmischwälder der tieferen Lagen (z.T. Eiche überwiegend). 3: Buchenbergwaldgebiete. 4: Buchengebiete (kieferarm). 5: Buchenwälder der montanen Höhenstufen mit Tanne (z.T. mit Fichte: Dreiecke) und grüne Dreiecke: subalpine Buchenwälder. 6: Kiefernwälder mit Eiche auf Sandböden. 7: Hainbuchenwald. 8: Hainbuchenwald mit Fichte und Linde. Kreise: Kiefern lokal dominierend.

kenkäfers, die hauptsächlich die Fichten befallen. Ihre mittlere Kronenverlichtung ist von 24% auf 29% angestiegen. Unter allen Baumarten weist die Fichte die höchste Mortalitätsrate auf (THÜNEN 2021). Teilweise sind Fichten großflächig abgestorben, das Holzüberangebot hat mittlerweile den Holzmarkt schwer getroffen. Aber auf vielen Flächen weist die Buche eine erfreuliche natürliche Verjüngung auf.

Da fast alle Wälder Wirtschaftswälder sind, stellen sie im strengen Sinne Forste dar, die durch die Forstwirtschaft bewirtschaftet werden. Der größte Anteil der deutschen Wälder ist in Privathand. Von den 11,4 Mio. ha. sind 48% Privatwald und 19% Eigentum von Körperschaften, 29% sind Eigentum der Länder und 4% im Eigentum des Bundes. Vor dem Hintergrund, dass große Mengen an Holz aus den Wirtschaftswäldern dauerhaft z.B. beim Bauen genutzt werden, kann die Holzproduktion auch als zeitweise C-Senke betrachtet werden. Da es in Deutschland zu wenig Naturwälder (Primärwälder) gibt, beschloss die Bundesregierung 2007 im Rahmen der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt, dass 5% der Wälder bis 2020 Naturwälder werden sollen. Nach Bewertung im Jahr 2019 durch das Bundesamt für Naturschutz gab es ein Jahr vor Ende dieser Frist nur knapp 3% Naturwälder (<https://www.bfn.de/>).

Böden in Deutschland

52% der Böden Deutschlands werden für die Landwirtschaft genutzt. An zweiter Stelle folgen mit 32% die Wälder. 13% der Landesfläche entfallen auf Infrastrukturen (Siedlungen und Verkehrsflächen).

Eine erste deutschlandweite Inventur landwirtschaftlicher Böden ergab eine genaue Abschätzung der Vorräte an organischem Kohlenstoff (THÜNEN 2018). Anhand von 3.104 beprobten Stellen in einem Raster von 8x8 km konnten die Kohlenstoffvorräte der Böden in Deutschland repräsentativ erfasst werden. Abb. 1.1-8 zeigt den

mittleren Vorrat an organischem Kohlenstoff für Ackerflächen, Weiden (Grünland), Sonderkulturen und Moore. Unterschieden wurde der Kohlenstoffgehalt im oberen (0-30 cm) und unteren Bodenbereich (30-100 cm). Dabei erkennt man die überragende Bedeutung der Moore; sie sind mit Abstand die kohlenstoffreichsten Böden. Sie enthalten bis zu zehnmal mehr Kohlenstoff als andere Böden. Obwohl Mooreböden und moorähnliche Böden nur rund 6% der landwirtschaftlichen Nutzfläche stellen, enthalten sie bezogen auf die Tiefe 0-100 cm rund ein Viertel der gesamten Bodenkohlenstoffvorräte landwirtschaftlich genutzter Böden. Aufgrund des hohen Kohlenstoffwertes spielt ihre Renaturierung für den Klimaschutz eine wichtige Rolle (s. Kap. 3.6).

Tonreiche Böden speichern bezogen auf die Tiefe 0-30 cm zweimal mehr organischen Kohlenstoff als tonarme Böden. Insgesamt spielt bei Mineralböden die Grundwassernähe eine wichtige Rolle. Böden mit einem Grundwasserstand oberhalb von 80 cm Bodentiefe enthalten deutlich mehr organischen Kohlenstoff.

Der Einfluss der Landnutzung zeigt sich vor allem im oberen Bereich des Bodens. Die ganzjährige Nutzung eines Grünlands ohne Bearbeitungsmaßnahmen erlaubt eine intensive Durchwurzelung. Dadurch findet man dort deutlich höhere Kohlenstoffvorräte als in Ackerböden.

Auch die Unterböden (30-100 cm Tiefe) sind von Bedeutung. Im Mittel befinden sich dort 35% der gesamten Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff. Insgesamt sind die landwirtschaftlichen Böden bezogen auf 0-100 cm Tiefe mit rund 2.500 Mio. t C mit Abstand der größte organische Kohlenstoffvorrat in Deutschland. Ihre Fläche von 16.7 Mio. ha (Hektar) ist größer als die der deutschen Wälder: 11,4 Mio. ha (Waldflächeninventur 2017; BMEL 2021b). Dementsprechend ist diesen Daten zufolge der gesamte Kohlenstoff-Vorrat in deutschen Wäldern kleiner und liegt bei 1,3 Mrd. t C bezogen auf 0-90 cm Tiefe (THÜNEN 2021).

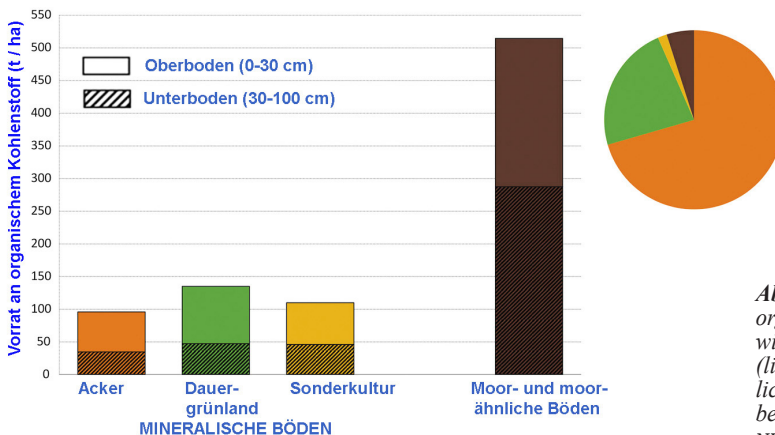


Abb. 1.1-8: Mittlerer Vorrat an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden (links), Anteil der unterschiedlichen Böden an der Gesamt-Probenanzahl (rechts oben) (aus THÜNEN 2018).

Es wird oft darauf hingewiesen, dass es wichtig wäre, die Kohlenstoffsenken weltweit auszuweiten. Wälder und Moore gelten als wichtige Kohlenstoffsenken. Als solche bezeichnet man Ökosysteme, die große Mengen Kohlenstoff binden und so die CO₂-Ansammlung in der Atmosphäre verlangsamen. Diese Senken sind dynamisch, ihre Kapazität kann regional wachsen, aber auch schrumpfen. Bisher gingen manche davon aus, dass der hauptsächliche Prozess dafür ein Verstärken der Photosynthese ist, das sich durch den Anstieg von Kohlendioxid in der Atmosphäre begründet. Dichte tropische Wälder in der Nähe des Äquators beispielsweise nehmen große Mengen CO₂ auf, aber nur so lange sie aufwachsen. Später hat sich ein dynamisches Gleichgewicht eingestellt. Dies gilt auch für Nationalparks und Naturschutzflächen, die immer wieder als C-Senken angegeben werden; die ungestörten Böden und die aufwachsende Vegetation speichern natürlich C bis zu einem (sehr spät anzunehmenden) Gleichgewicht, das vom C-Haushalt des gesamten Ökosystems abhängt. Danach stellen sie oft nur »C-Speicher« dar.

Gefährdung der Böden und Vegetation

Fruchtbarer Boden ist eine sehr empfindliche Ressource; beschädigte Böden erneuern sich nur sehr langsam. Nach Angaben der UN gehen jährlich weltweit viele Millionen Hektar an fruchtbarem Boden verloren – ausgelöst vor allem durch falsche landwirtschaftliche Nutzung. Insbesondere dort, wo einseitige Fruchtfolgen und Monokulturen vorherrschen, werden Böden degradiert und ihre Leistungsfähigkeit stark beeinträchtigt. Der Boden wird für den Ackerbau unbrauchbar – mit verheerenden Folgen für die betroffenen Menschen. Gerade die am wenigsten entwickelten Länder der Welt sind besonders stark von Bodendegradation betroffen. Wind und Niederschläge können dann die Bodenschicht auf den freiliegenden Ackerflächen leicht abtragen (Erosion) (s. Kap. 3.2). Weltweit sind die meisten degradierten Flächen von Erosion betroffen. Auch durch Versalzung durch Eindringen von Salzwasser in Küstennahe als Folge des Meeresspiegelanstiegs und/oder der übermäßigen Grundwasserentnahme sowie vor allem durch eine falsche Bewässerung (s. Kap. 3.3) führt zum Verlust von wertvollen, fruchtbaren Böden. Die Versalzung von Ackerflächen ist in ariden Ländern eines der größten Probleme der Landwirtschaft. Die Ausbreitung der Wüsten (Desertifikation) stellt eine weitere Bedrohung für fruchtbare Böden dar. Dagegen werden in einigen Ländern wie China umfassende Schutzmaßnahmen durchgeführt. Für die Sahel-Zone gibt es auch entsprechende Pläne (s. Kap. 7.5).

Durch Versiegelung für neue Siedlungs- und Verkehrsflächen gehen z.B. in Deutschland große Boden-Flächen verloren (s. Kap. 5.2). Die Ausbreitung der Städte findet weltweit vor allem auf fruchtbaren Flächen statt.

Der starke Einsatz von Pestiziden und Kunstdünger schädigt die Böden. Die Belastung mit Stickstoff ist trotz mancher Verbesserungen in den letzten Jahren weiterhin zu hoch. Viele unterschiedliche organische Schadstoffe (PCB, PAK oder CKW) und Schwermetalle können aus der Luft und mit Abfällen in die Böden gelangen. Sie können wegen ihrer Eigenschaften schädlich für Mensch und Umwelt sein. Ein zunehmendes Problem ist die Belastung durch Plastik und Mikroplastik, die man auf und in landwirtschaftlichen Böden findet.

Durch ihre Filter- und Pufferfunktion wirken Böden wie eine Senke für die eingetragenen Schadstoffe und verhindern, dass diese in das Grundwasser gelangen oder von Pflanzen aufgenommen werden. Diese Funktionen wirken solange, wie die Bodenkapazität dafür ausreicht. In einem gewissen Umfang ist der Boden mit seiner Organismenvielfalt sogar fähig, manche Schadstoffe abzubauen. In der besonders intensiven Landwirtschaft können so aber Schadstoffe wie Neonicotinoide (Insektizide) ins Grundwasser gelangen.

Die flächenhafte Schädigung des Bodens ist oft mit Sanierungsmaßnahmen nicht komplett wieder gut zu machen. Eine gewisse Sanierung ist zwar häufig möglich – sie ist aber sehr aufwändig und teuer. Eine wirksame Vorsorge ist volkswirtschaftlich betrachtet immer viel kostengünstiger, als Bodenschäden beseitigen zu müssen.

Sowohl Übernutzung in der Landwirtschaft als auch Unnutzung – z.B. Entwaldung oder Trockenlegung von Mooren und darauffolgende landwirtschaftliche Nutzung – führen zu Bodendegradation und damit auch zur Freisetzung riesiger Mengen an CO₂, Methan und Lachgas. Modellierungsstudien zeigen einen deutlichen Einfluss von Landbedeckungsänderungen und Land-Managementformen auf das Klima. Ihre Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf sind jedoch global nur sehr unsicher zu bestimmen, da andere biogeophysikalische Effekte wie Albedo (Reflektivität der Landoberfläche) eine gegenteilige Auswirkung haben. In den vergangenen 40 Jahren sind durch nicht nachhaltige Bodenbewirtschaftung bereits große Ackerflächen unbrauchbar geworden. Insgesamt ist die Existenz von mindestens 1,5 Mrd. Menschen durch Land- und Bodendegradation in Gefahr, betroffen sind vor allem Subsahara-Afrika und Südamerika.

Verglichen mit 2005 wird nach Einschätzung der Welternährungsorganisation FAO die verfügbare Anbaufläche pro Kopf bis 2050 um rund zwölf Prozent in den Industrieländern und um 25 Prozent in den Ent-

wicklungsländern abnehmen. Die landwirtschaftliche Nutzfläche pro Person sinkt damit in Entwicklungsländern auf 0,14 ha. 1960 waren es noch 0,33 ha.

Nach Modellrechnungen erwartet man künftig Verluste von durchschnittlich 0,19 t C pro Hektar und Jahr für Ackerböden. Sie werden besonders dort auftreten, wo die aktuellen Kohlenstoffvorräte relativ hoch sind. Je höher die Temperaturen und je geringer die Niederschläge in der Vegetationszeit sind, desto größer können die Verluste an organischem Kohlenstoff sein. Das liegt am beschleunigten Abbau von organischem Bodenkohlenstoff. Eine Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel wäre auch für den Klimaschutz wichtig.

Schlussbetrachtung

Die öffentliche Debatte um den »globalen Wandel« konzentriert sich vor allem auf den Treibhauseffekt, auf die damit verbundene Erwärmung der Atmosphäre und auf die Rückkopplung durch den Kohlenstoffkreislauf. Doch die Erde ist viel komplexer. Für ein umfassendes Verständnis des Erdsystems müssen daher auch andere Zusammenhänge viel gründlicher beachtet und mit einbezogen werden. Hierzu gehören insbesondere die Wechselwirkungen des Kohlenstoffkreislaufs mit den Wasser- und Nährstoffkreisläufen sowie globale Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen der Vegetation, den Böden und der Atmosphäre. Dabei kommt dem Boden eine Schlüsselrolle zu. Er ist eine wertvolle Ressource, die sich nur langsam bildet, die aber rasch verloren gehen kann. Die anthropogenen Veränderungen der Bodenbedeckung, global und regional, sind heute von ausschlaggebender Bedeutung für die zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten. Die Bedeutung und Gefährdung von Boden und Vegetationsbedeckung, die zunehmende Waldvernichtung, das Ausufernde der städtischen Infrastrukturen, Intensivierung der Landwirtschaft und große Bewässerungsprojekte, all dies hat Auswirkungen, die in den folgenden Kapiteln näher beleuchtet werden. Eine nachhaltige Bodennutzung, ein Stopp der Abholungen und die Verringerung des derzeit beispiellosen Artenverlustes, Renaturierungen und Aufforstungen sind unumgänglich, um eine langfristige Bewohnbarkeit des Planeten Erde zu gewährleisten.

Literatur

- BRECKLE, S.-W. (Hrsg.) (2021): Ökologie der Erde – Band 3. 3. Auflage. Schweizerbart, Stuttgart. 803 S.
 BRECKLE, S.-W. & M. D. RAFIQPOOR (2019): Vegetation und Klima. Springer 484 pp.
 BMEL (2021a): Baumarten und ihre Aufteilung. <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/waelder-entdecken/baumarten/> (Abgerufen am 9.3.2021).

- BMEL (2021b): Wald und Forstwirtschaft in Deutschland. <https://www.waldkulturerbe.de/wald-und-forstwirtschaft-in-deutschland/> <https://www.waldkulturerbe.de/wald-und-forstwirtschaft-in-deutschland/waldwirtschaft/zahlen-und-fakten-zum-wald-in-deutschland/zahlen-und-fakten-zum-wald-in-deutschland/> (Abgerufen am 10.4.2021).
 ERB, K. H., C. LAUK, T. KASTNER, A. MAYER et al. (2016): Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. Nature Communications. 7:(11382). 9 pp. <https://doi.org/10.1038/ncomms11382>.
 ERB, K. H., T. KASTNER, C. PLÜTZAR, A. L. BAIS et al. (2017): Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. Nature 553, 73–76 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25138>.
 FAO (2020): Global Forest Resources Assessment 2020. Main report. <https://doi.org/10.4060/ca9825e>.
 FOLEY, J. A., N. RAMANKUTTY, JONATHAN A. FOLEY, K. A. BRAUMAN et al. (2011): Solutions for a cultivated planet. Nature 478, 337–342 (2011) 6 pp. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature10452>.
 FRIEDLINGSTEIN, P., M. O'SULLIVAN, M. W. JONES et al. (2020): Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 12, 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
 IPCC (2000): Land Use, Land-Use Change and Forestry. Eds. Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken. Cambridge University Press, UK. 375 pp.
 IPCC (2019): IPCC-Sonderbericht über Klimawandel und Landsysteme (SRC-CL). Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. 38 S.
 KUBIENA, W. L. (1950): Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. Enke/Stuttgart, 392 S.
 MÖLLER, C. M., D. MÜLLER & J. NIELSEN (1954): Graphic presentation of dry matter production of beech. Det forstlige Forsøgsvæsen i Danmark 21: 327-335.
 PUGH, T. A. M., M. LINDESKOG, B. SMITH et al. (2019): The role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. In: Proc Nat Acad Sc USA (PNAS), <https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116> PNAS 116 (10): 4382-4387
 ROBERTS, N., R. M. FYFE, J. WOODBRIDGE et al. (2018): Europe's lost forests: a pollen-based synthesis for the last 11,000 years. Sci Rep 8, 716.
 SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2018): Lehrbuch der Bodenkunde. (Hrsg: Amelung W. et al.) 17. Aufl. Springer, 772 S.
 SCHIRRMIEISTER, L. & H.-W. HUBBERTEN (2014): Permafrost – Ein weit verbreitetes Klimaphänomen der Arktis und Subarktis. In: LOZÁN, J.L., H.GRASSL, D.NOTZ & D.PIEPENBURG. WARNSIGNAL KLIMA: Die Polarregionen. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. 53-61 S. ISBN: 978-39809668-63.
 THÜNEN (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. 48 S. https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf.
 THÜNEN (2021): Institut für Waldökosysteme. Ergebnisse des Waldzustandserhebung 2020. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2020.pdf?72> S.
 TREPEL, M. (2008): Zur Bedeutung von Mooren in der Klimadebatte. Jahresbericht des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. 2007/08, 12:61-74.
 UBA (2015): Ressourceneffiziente Landnutzung - Wege zu einem Global Sustainable Land Use Standard (GLOBALANDS) <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/resource-efficient-land-use-towards-a-global>.
 UBA (2020): Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft> (Abgerufen am 16.3.2021).
 WALTER, H. & H. STRAKA (1970): Arealkunde - Floristisch-historische Geobotanik. Ulmer, Stuttgart 478 pp.

Kontakt:

Dr. José L. Lozán
 Wissenschaftliche Auswertungen
 JL-Lozán@t-online.de

Prof. i. R. Dr. Siegmund-W. Breckle
 Ökologie, Bielefeld
 sbreckle@gmx.de

Prof. Dr. Harmut Graßl
 Max Planck Institut für Meteorologie
 Hamburg

LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE & H. GRAßL (2021): Boden und Vegetation: Definition, Verteilung Bedeutung. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & DIETER KASANG (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 15-25. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.02.