



Das Klima ist nicht nur ein wesentlicher Faktor der Bodenentwicklung. Es beeinflusst auch alle im Zuge der Bodennutzung in und auf dem Boden ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse vgl. Abschn. 1.2.1. Dabei spielen vor allem die Temperatur und die Verfügbarkeit von Wasser eine entscheidende Rolle (Lal und Stewart 2019).

Aber auch der Boden beeinflusst das Klima. Diese Beeinflussung erfolgt durch die Emission von klimawirksamen Spurengasen, vgl. Abschn. 4.2.4.8. Zudem beeinflusst der Boden durch die Speicherung von Regenwasser die Grundwasserneubildung und die erdoberflächennahe Gesamtmenge an Wasser. Durch die Wasserverdunstung von der Bodenoberfläche = Evaporation und durch die Transpiration der Pflanzen beeinflusst der Boden auch den Wassergehalt der bodennahen Luftschicht.

Die Entstehung von Böden beansprucht lange Zeiträume, in der Regel Jahrzehnte, Jahrhunderte bis Jahrtausende, vgl. Abschn. 1.2.1. Im Gegensatz dazu verlaufen die biologischen Prozesse in und auf dem Boden, wie zum Beispiel das Entstehen und Vergehen der tierischen und pflanzlichen Organismen, schnell, ebenso wie die Entwicklung klimawirksamer Spurengase und der Austausch mit der Atmosphäre, das heißt in Stunden, Tagen und Monaten.

Daher macht sich die Wirkung des Klimas, zum Beispiel durch Änderung der Temperatur und der Niederschläge sowie der Luftbewegung, vor allem bei den bodenbiologischen Prozessen bemerkbar und ist damit für alle biologischen Prozesse in terrestrischen Ökosystemen und somit auch für die land- und forstwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung ein entscheidender Faktor.

Das Klima steuert jedoch nicht nur die biologischen Prozesse im Boden, sondern auch die für die Besiedelung und Nutzung von Gebieten bedeutenden mechanisch-physikalischen Bodeneigenschaften, die für die Errichtung und die Erhaltung der ökonomisch-technischen Infrastruktur entscheidend sind.

So entscheidet in Dauerfrostgebieten (Permafrostgebieten) die Bodentemperatur über die Errichtung und technische Stabilität der Fundierungen von

Gebäuden, Straßen, Brücken und Bahntrassen, weil diese im Eis des Bodens verankert sind.

Dies gilt auch für die Stabilität von Bergformationen in den Hochgebirgen, die ab einer gewissen Höhe von Dauerfrostbedingungen abhängig ist, weil Teile des Gebirges durch Dauerfrost zusammengehalten werden. Eine Reihe von Bergstürzen in den südlichen Zentralalpen Europas während der vergangenen Jahre wird auf die Erwärmung infolge Klimawandel zurückgeführt.

Daneben besteht auch eine deutliche Beeinflussung der Klimaparameter Temperatur, Feuchte und Windgeschwindigkeit der Atmosphäre durch Reaktionen des Bodens.

So verursacht die agrarische und forstliche Bodennutzung nicht nur ca. 25 % der klimawirksamen Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Di-Stickstoffoxid (N_2O), sondern beeinflusst auch den Austausch von Wasser zwischen Boden und Atmosphäre durch die Beschaffenheit der Bodenoberfläche und den Bodenbewuchs. Dabei spielen die kurzweilige Einstrahlung während des Tages und die langweilige Rückstrahlung während der Nacht (Albedo) eine entscheidende Rolle für den täglichen Gang der Temperatur und Feuchte der erdnahen Luftschicht. Auch die resultierenden erdnahen Luftbewegungen werden durch die Beschaffenheit der Bodenoberfläche (zum Beispiel Struktur, Farbe und Pflanzenbewuchs) wesentlich beeinflusst.

Nachfolgend wird vor allem die Wechselwirkung zwischen der land- und forstwirtschaftlichen Bodennutzung und dem Klimawandel beschrieben. Außerdem wird aufgezeigt, wie der Klimawandel die Böden und die technisch-ökonomische Infrastruktur in Dauerfrostgebieten und damit die Lebensbedingungen in großen Räumen der Erde beeinflusst.

6.1 Weltweite Beeinflussung der Bodennutzung durch den Klimawandel

Was bedeutet Klimawandel und was sind seine Auswirkungen auf die Böden und ihre Nutzung?

Infolge der Produktion klimawirksamer Treibhausgase durch die Nutzung fossiler Energie, vor allem durch Industrie, Haushalt, Transport und menschliche Eingriffe in die natürlichen Ökosysteme für die agrarische und forstliche Produktion von Biomasse (Abb. 6.1), steigen die mittleren Jahrestemperaturen bei gleichzeitiger Veränderung der Niederschläge in unterschiedlichen Regionen der Erde, in Europa vor allem im mediterranen Raum (Abb. 6.2).

Aus Abb. 6.1 wird deutlich, dass der Anteil der CO_2 -Emissionen aus fossilen Energieträgern und industriellen Prozessen von 1970 bis 2010 von 55 % auf 65 % zugenommen hat, während die Anteile von CO_2 aus der landwirtschaftlichen und forstlichen Bodennutzung im Jahr 2010 bei 11 %, der Anteil von CH_4 bei 16 % und der Anteil von N_2O bei 6,2 % lag.

In Abb. 6.2 wird deutlich, dass die Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur in °C von 2081 bis 2100 im Vergleich zu 1986 bis 2005 vor allem in

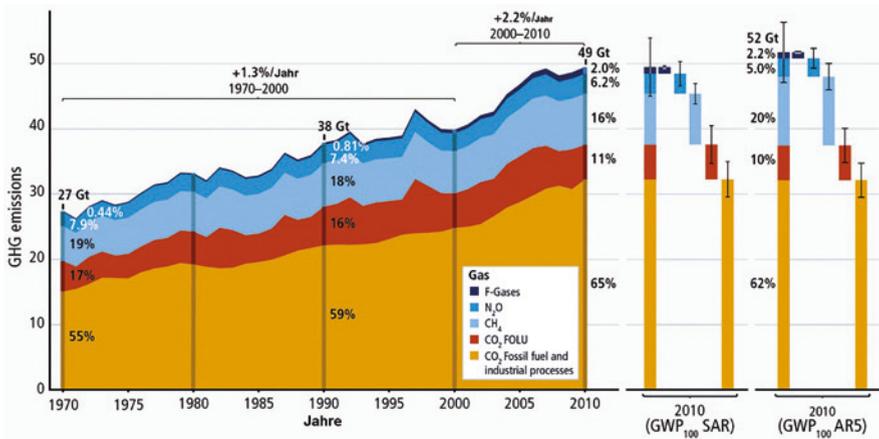


Abb. 6.1 Globale Veränderung der jährlichen anthropogenen Treibhausgasemissionen von 1970–2010 (IPCC 2014)

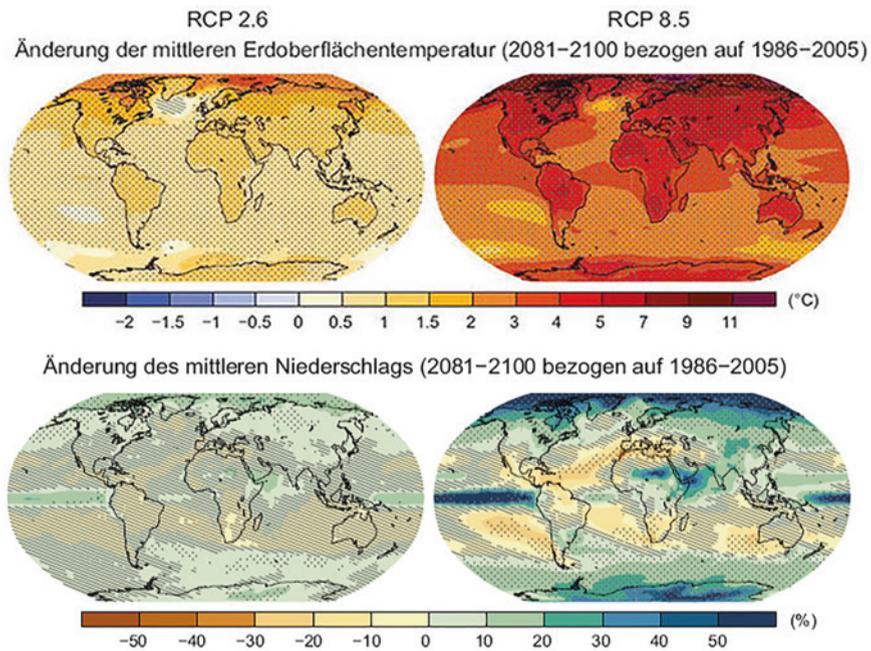


Abb. 6.2 Globale Änderung der mittleren Oberflächentemperatur der Erde und der mittleren Niederschläge 2081–2100 gegenüber 1986–2005 (IPCC 2014)

den nördlichen Breiten und in der Antarktis erfolgen wird, während bezüglich der Änderung des mittleren Niederschlags in % eher eine Verringerung, zum Beispiel in der Mediterranregion Europas zu erwarten ist.

Eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur in den nördlichen Breiten und in der Antarktis (Abb. 6.2), hat unter Dauerfrostbedingungen, beispielsweise im sibirischen Raum der Russischen Föderation, sehr verschiedene Auswirkungen. Auf der einen Seite erhöht sich die Intensität und Geschwindigkeit bodenbiologischer Prozesse. Dadurch wird die über Jahrhunderte aufgebaute organische Substanz der Oberböden biologisch abgebaut und in die Bestandteile Wasser, Elemente und CO_2 zerlegt. Dabei werden erhöhte Mengen klimawirksamer Spurengase freigesetzt, vor allem CO_2 , die den Klimawandel weiter beschleunigen.

Durch die Temperaturerhöhung wird gleichzeitig die Dichte des Eises im gefrorenen Untergrund verringert, wodurch die Stabilität von Bauten und Gebirgsregionen beeinträchtigt wird, vgl. Abschn. 1.2.2.2. Dies bedeutet für die Zukunft, dass der Klimawandel weltweit die Dauerbesiedelung von Permafrostregionen beeinträchtigen wird.

Alle diese Veränderungen sind hauptsächlich anthropogenen Ursprungs.

6.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die terrestrischen Ökosysteme allgemein und deren agrarische und forstliche Nutzung

Die geschilderten Wirkungen des Klimawandels sind weltweit, jedoch je nach Region und den lokalen Bedingungen sehr unterschiedlich.

Dies gilt zunächst für die alpinen Regionen mit einem vertikalen Wandel der Lebensbedingungen für Pflanzen und Tiere, wodurch zum Beispiel die Kälte liebenden Arten gezwungen sind, in die Höhe zu wandern, weil sie sonst in ihrer Existenz bedroht sind. Derzeit zeigen Beobachtungen in europäischen Gebirgsregionen, dass die sensiblen Arten innerhalb von zehn Jahren ca. drei Meter in die Höhe wandern.

Für die agrarische und forstliche Pflanzenproduktion bedeutet dies insgesamt, dass durch die Erwärmung bei einigen Arten die physiologischen Grenzwerte erreicht oder bereits überschritten werden. Dies zeigt sich nicht nur im Wuchsverhalten, sondern macht sich auch zusätzlich in der Anfälligkeit gegen pflanzliche und tierische Schädlinge bemerkbar.

Ebenso verändert sich der Wasserbedarf bei höheren Temperaturen, der nur bei wenigen Pflanzenarten durch die gleichzeitige Erhöhung des CO_2 -Gehalts der Luft teilweise kompensiert wird.

Die Erhöhung der Temperatur ermöglicht auch die Einwanderung oder die Verbreitung nicht autochthoner Arten, die als invasive Arten einheimische Pflanzen- und Tierarten verdrängen und auf diese Weise die Ökologie ganzer Biotope verändern können (Kap. 7).

Mit der Veränderung der Menge und der zeitlichen Verteilung sowie der Intensität der Niederschläge verändert sich die Wasserbilanz von Pflanzenstandorten

und Böden. Durch erhöhten Oberflächenabfluss sinkt die Versickerung und damit die Grundwasserneubildung. Da durch den verstärkten Oberflächenabfluss die Erosion erhöht wird, vor allem in Hanglagen, müssen verstärkte Anstrengungen zur Entwicklung neuer Techniken der Bodenbewirtschaftung und insbesondere des Bodenschutzes unternommen werden. Dies bedeutet aber gleichzeitig auch, dass insbesondere die Bodenverdichtungen durch schwere Maschinen, die eine ausreichende Versickerung des Regenwassers verhindern, mit neuen Techniken schneller wieder in ihrer negativen Wirkung verringert werden.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in Zukunft mit Zunahme meteorologischer Extremereignisse eine Umstellung der agrarischen und forstlichen Produktion und die Wahl neuer Pflanzenarten und neuer Anbautechniken und -zeiten notwendig machen (Lavalle et al. 2009; IPCC 2014).

Während dies in der Landwirtschaft bei der Nutzung annueller Pflanzen, zum Beispiel im Ackerbau, weniger Probleme bewirken dürfte, ist die Situation in der Forstwirtschaft sehr viel kritischer. Hier sind die Risiken erheblich höher, nicht nur, weil mittel- bis langfristige Voraussagen über zukünftige Klimabedingungen mit erheblichen Unsicherheiten belastet sind, sondern für einzelne Baumarten nur wenige Erfahrungswerte bezüglich pflanzenphysiologischer Toleranzbereiche vorliegen. Wegen des langsamen Wachstums von Waldbeständen müssen jedoch Entscheidungen über die Wahl der Baumarten und deren Provenienz früh getroffen werden.

6.3 Bekämpfung des Klimawandels durch Veränderung der Bodennutzung, insbesondere durch Bindung des organischen Kohlenstoffs in Böden

Zwischen Boden, Bodennutzung und Klimawandel bestehen deutliche Wechselbeziehungen, nicht nur durch die Erzeugung und den Austausch klimawirksamer Gase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Di-Stickstoffoxid (N_2O), sondern auch durch den Austausch von Wasser und Energie zwischen der Bodenoberfläche und der Atmosphäre, verursacht durch das Wechselspiel zwischen Einstrahlung und Albedo.

Eine Veränderung der Temperatur wirkt sich vor allem auf die bodenbiologischen Prozesse aus. Diese laufen mit Zunahme der Bodentemperatur schneller ab, was zu einer erhöhten Produktion von CO_2 , aber zusätzlich auch von CH_4 und N_2O führt.

Die Temperaturbedingungen an der Bodenoberfläche werden jedoch nicht nur durch die kurzweilige Einstrahlung während des Tages bestimmt, sondern auch durch die Intensität der langwelligen Rückstrahlung von der Bodenoberfläche in die Atmosphäre während der Nacht, der Albedo.

Sowohl die Adsorption der kurzwelligen Strahlung durch die Erdoberfläche während des Tages wie auch die langwellige Rückstrahlung von der Erdoberfläche in die Atmosphäre während der Nacht werden durch die Eigenschaften der Bodenoberfläche bestimmt.

Dies sind im Wesentlichen die Bodenstruktur und die Bodenfarbe sowie die Art der Bodenbedeckung, zum Beispiel Wiese, Wald oder Acker. Diese Faktoren sind von der Art der Bodenbewirtschaftung abhängig. Während beim Pflanzenbewuchs neben der Art der Pflanzen die Höhe und Dichte bestimmend sind, hängt die Struktur der Bodenoberfläche und die Farbe von der Art der Bearbeitung ab, zum Beispiel von der Art der Lockerung des Oberbodens oder von der Veränderung des Humusgehalts und damit auch der Bodenfarbe. Eine Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz im Oberboden verbessert außerdem die Strukturstabilität und erhöht damit den Widerstand gegen Erosion durch extreme Niederschlagsereignisse und Wind, die durch den Klimawandel verursacht werden.

Von zentraler Bedeutung für die Bekämpfung des Klimawandels ist die Verringerung des Anstiegs klimawirksamer Gase in der Atmosphäre. Dabei kommt dem Boden eine besondere Bedeutung zu, weil er nach den Ozeanen die zweitgrößte Kohlenstoffmenge enthält, das heißt ca. 7,5-mal mehr als die gesamte Atmosphäre.

Laut Zechmeister-Boltenstern et al. (2019) stammen weltweit ca. 50 % aller CO_2 - und N_2O -Emissionen und ein Drittel aller CH_4 -Emissionen aus dem Boden.

Im Hinblick auf die Bekämpfung des Klimawandels stellt sich daher die Frage, ob durch eine Kohlenstoffspeicherung im Boden eine Verringerung des CO_2 -Anstiegs in der Atmosphäre erreicht werden kann. Diese Frage hängt von den jeweils vor Ort gegebenen Bodeneigenschaften (Abschn. 2.1), von der Art der agrarischen und forstlichen Bodenbewirtschaftung, vgl. Abschn. 4.2.4.8, und von einer Wiederherstellung und Sanierung degradierter Böden ab, denn die Zugänglichkeit von Bodenoberflächen für CO_2 ebenso wie für Nähr- und Schadstoffe kann durchaus auf nur noch ca. 10 % des Kapazitätswertes absinken. Je stabiler der Boden, je besser strukturiert er ist, desto größer ist auch die Zugänglichkeit und damit die Speicherfähigkeit. Außerdem sind die lokalen Klimabedingungen, vor allem Temperatur und Niederschlag, von Bedeutung.

Dabei ist zu beachten, dass große Anteile der global in Böden gebundenen organischen Substanz in den Dauerfrostböden der nördlichen und südlichen Breiten, zum Beispiel in Sibirien und in Feuerland sowie in den Gebirgen der Erde vorkommen. Diese werden bei Klimaerwärmung durch biologische Zersetzung (Metabolisierung und Mineralisierung) abgebaut und als CO_2 , zusammen mit weiteren Spurengasen wie CH_4 und N_2O in die Atmosphäre entlassen.

Außerdem entscheidet in den Permafrostböden der Gehalt an organischer Substanz im Oberboden über die Auftautiefe des Bodens während des Sommers. Je höher der Humusgehalt, umso geringer die Auftautiefe, weil die Wärmeleitfähigkeit des Bodens durch höhere Anteile an organischer Substanz verringert wird.

Auf der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris (COP 21) wurde als Programm vorgeschlagen, die organische Substanz in den Ackerböden der Erde jährlich in 0 bis 40 cm Tiefe um vier Tausendstel (4 per Tausend) zu erhöhen. Dieses Konzept sollte in der UN-Klimakonferenz 2017 in Berlin (COP 23) als konkretes Programm formuliert und umgesetzt werden.

Dieser Forderung steht jedoch entgegen, dass wir derzeit nicht mit Sicherheit die Prozesse der Festlegung und zeitlichen Konservierung von organischer Substanz

in Böden kennen. Unabhängig von den klimatischen Bedingungen und der dadurch gesteuerten biologischen Aktivität hängt die langfristige Kohlenstoffbindung in Böden von der kleinräumlichen Anordnung der festen Bodensubstanz sowie deren mineralogischer und chemischer Zusammensetzung ab, die je nach Bodentyp außerordentlich unterschiedlich ist.

Nach Dungait et al. (2019) sind es vor allem zwei Parameter, die wesentlich zur mittel- bis langfristigen Konservierung von organischer Substanz in Mineralböden beitragen: die Bindung der organischen Substanz an Mineraloberflächen und deren zusätzlicher räumlicher Schutz durch Einschluss in Aggregate, wodurch sie für eine Zersetzung durch Mikroorganismen nicht erreichbar sind.

In jedem Fall erscheint es als sicher, dass die Konservierung bzw. Speicherung von organischer Substanz in Böden mengenmäßig wie zeitlich begrenzt ist, und daher die durch Verbrennung fossiler Brennstoffe weiter steigenden Mengen an Kohlenstoff in der Atmosphäre nicht dauerhaft im Boden festgelegt bzw. gespeichert werden können. Dazu kommt, dass sich bei weiterer Erderwärmung die Böden, besonders die Dauerfrostböden der nördlichen und südlichen Hemisphäre und der Gebirge, von einer Kohlenstoffs Senke zu einer Kohlenstoffquelle entwickeln werden.

Im Gegensatz dazu ist die Bedeutung der Weltmeere als Senke für das CO_2 der Atmosphäre von erheblich größerer Bedeutung, da diese zum Beispiel im Zeitraum von 1994 bis 2007 in der Lage waren, ca. 31 % alles anthropogen in diesem Zeitraum emittierten CO_2 zu binden (Gruber et al. 2019). Die enorme Bedeutung dieser Senke liegt in der Unabhängigkeit der Bindung von kurz- bis mittelfristigen äußeren, klimatischen Einflüssen. Bisher bestehen auch keine Anzeichen einer Sättigung der Meere, das heißt, dass sich die CO_2 -Bindung mit zunehmender Zeit verringert, obwohl diese Bindung zunächst oberflächlich erfolgt und der Kohlenstoff erst später durch Diffusion in Tiefen von mehr als drei Kilometer weiter verteilt wird.

Es ist allerdings zu beachten, dass die Versauerung der Böden durch die CO_2 -Bindung wegen der hohen mikrobiologischen Aktivität und der kontinuierlich fortschreitenden Verwitterung der Gesteine geringer ist als im Meerwasser.

Literatur

- Dungait JAJ, Berhe AA, Gregory AS, Hopkins DW (2019) Physical protection and mean residence time of soil carbon. In: Lal R, Stewart BA (Hrsg) Soil and climate. CRC Press, Boca Raton, S 171–181
- Gruber N, Clement D, Carter BR, Feely RA, van Heuven S, Hoppema M et al (2019) The ocean sink for anthropogenic CO_2 from 1994 to 2007. *Science* 363:1193–1199
- IPCC (2014) Klimaänderung 2014 – Synthesebericht. Genf, Schweiz
- Lal R, Stewart BA (Hrsg) (2019) Soil and climate. CRC Press, Boca Raton
- Lavalle C, Micale F, Durrant HAT, Camia A, Hiederer R, Lazar C, Conte C, Amatulli G, Genovesi G (2009) Climate change in Europe -3: Impact on agriculture and forestry – A review. *Agron Sustain Dev* 29:433–446
- Zechmeister-Boltenstern S, Diaz-Pinés E, Spann C, Hofmann K, Schnecker J, Reinsch S, Lal R, Stewart BA (2019) Soil and climate. CRC Press, Boca Raton, S 11–59