

Boden

Eva-Maria Pfeiffer, Annette Eschenbach, Jean Charles Munch

- 20.1 Diversität von Böden – 204**
- 20.2 Böden im Klimasystem: Funktionen und Ökosystemdienstleistungen – 205**
 - 20.2.1 Folgen für die natürlichen Standortfunktionen von Böden – 206
 - 20.2.2 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt – 208
 - 20.2.3 Böden und ihre unverzichtbaren Klimafunktionen – 208
- 20.3 Klima- und Bodenschutz zum Erhalt der Ressource Boden – 210**
 - 20.3.1 Strategien und Herausforderungen – 211
- 20.4 Kurz gesagt – 211**
 - Literatur – 211**

Wir müssen nicht tief graben, um die Wohlfahrtswirkungen von Böden zu erfahren: Umweltfaktoren und Lebewesen haben ein buntes Mosaik von Böden geschaffen – mit großer Vielfalt von Formen und Eigenschaften. Aus den Umwandlungsprodukten mineralischer und organischer Substanzen sind dabei eigene Naturkörper entstanden, die im Gegensatz zum Ausgangsgestein mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzt sind. Böden speichern und regulieren Nährstoffe, Energie und Wasser und greifen regelnd in den Naturhaushalt ein – und dies fast zum Nulltarif.

Böden bieten Pflanzen, Tieren und Menschen Lebensraum und Standort. Sie spielen eine zentrale Rolle in der Umwelt und im Klimageschehen. Dabei erfüllen sie unverzichtbare Funktionen: Böden dienen der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie von Rohstoffen und Bioenergie; sie stellen die Grundlage für wertvolle Naturschutzgebiete dar und sind Archive der Kultur- und Landschaftsgeschichte. Da Böden eine so wichtige Ressource sind, stehen sie unter gesetzlichem Schutz (Bodenschutzgesetz, BBodSchutzG 1998). Zentrales Anliegen eines nachhaltigen Erdsystemmanagements muss es sein, unsere Böden mit ihren vielfältigen Funktionen zu erhalten – sowohl als wichtige Standorte für Acker, Grünland, Wald, Forst oder städtische Lebensräume als auch für naturnahe Systeme wie Moore,



■ **Abb. 20.1** Die Schwarzerde aus weichselzeitlichem Löss (Eickendorf, Magdeburger Börde), der höchstbewertete Boden Deutschlands: Dieser „Bodenschatz“ des Mitteldeutschen Trockengebiets ist durch unsachgemäßen Flächenverbrauch und klimabedingte Sommertrockenheit und Niederschlagsverschiebungen bedroht

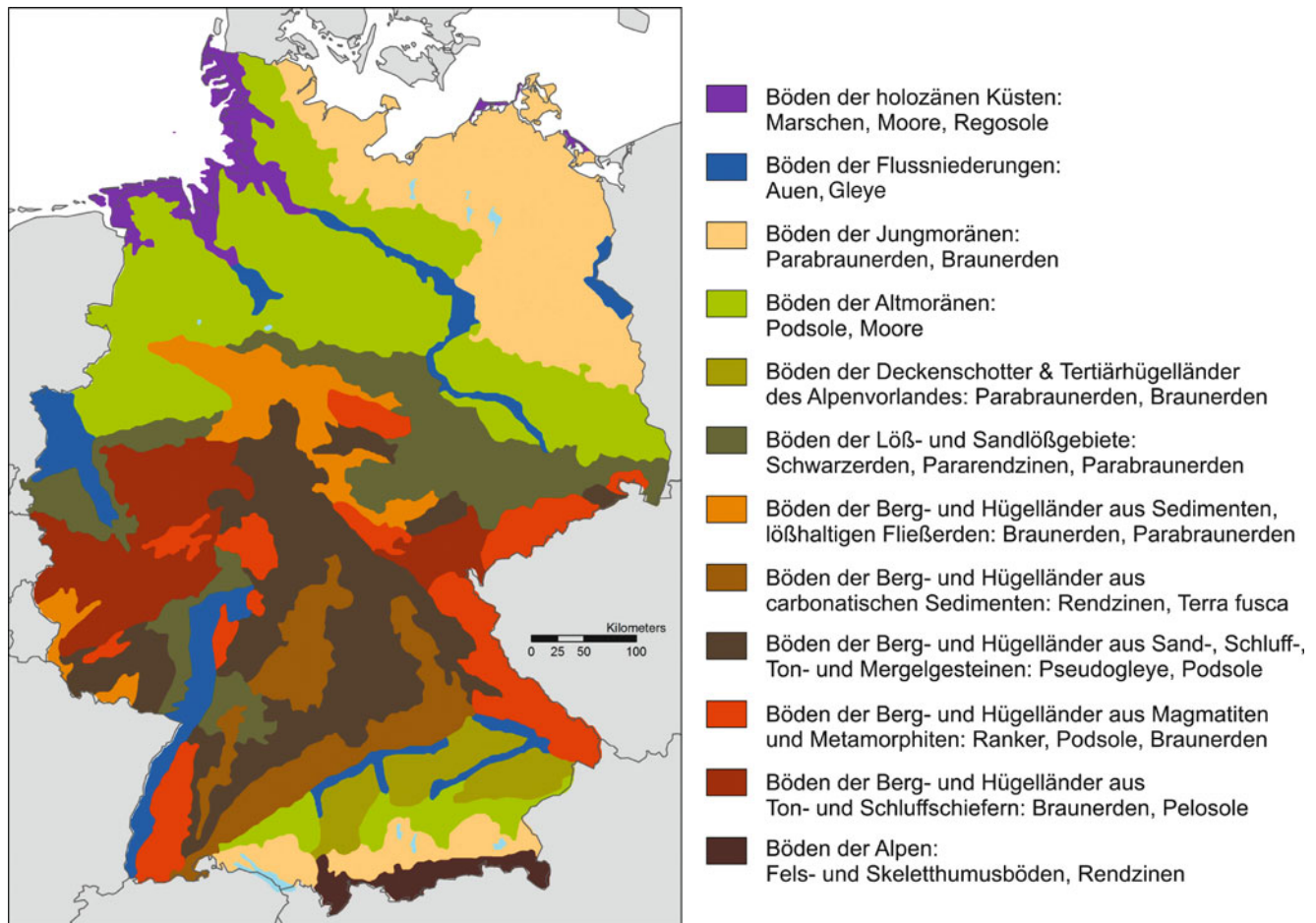


■ **Abb. 20.2** Die Kalkmarsch aus holozänen marinen Feinsanden (Katinger Watt, Nordfriesland), ein wertvoller Forststandort an der Nordseeküste: Diese ertragreichen Böden sind durch den Meeresspiegelanstieg extrem gefährdet

Küsten, Auen oder Trockenrasen. Böden stellen begrenzte Ressourcen dar, die durch Intensivierung der vielen Nutzungs- und Produktionsansprüche extrem belastet oder sogar unwiderruflich vernichtet werden. Durch ihre Einbindung in die Energie-, Wasser- und Stoffkreisläufe gefährden darüber hinaus die zu erwartenden Temperatur- und Niederschlagsänderungen die Funktionen und Leistungen dieser zentralen Lebensgrundlage auch in Deutschland.

20.1 Diversität von Böden

Böden sind Naturkörper mit einem ganz eigenen Aufbau und eigener Klassifikation. Im Gelände charakterisiert man sie anhand von systematischen Profilbeschreibungen, wobei das Bodenprofil ein Längsschnitt durch die oberen Meter der Erdkruste darstellt. Böden lassen sich in abgrenzbare Tiefenbereiche aufteilen, in sogenannte Bodenhorizonte. Diese entstehen im Verlauf der Bodenbildung aus Gesteinen durch Umwandlung und Verlagerung von Stoffen oder Energieeintrag durch Pflanzen. Die verschiedenen Horizontkombinationen definieren die unterschiedlichen Bodentypen wie z. B. die durch klimabedingte Trockenheit belasteten, wertvollen Schwarzerden (■ Abb. 20.1) oder die durch den Meeresspiegelanstieg gefährdeten ertragreichen Kalkmarschen (■ Abb. 20.2). Das Klima, Gestein und Relief, die Organismen und der Mensch haben im Laufe der



■ **Abb. 20.3** Böden der verschiedenen Regionen in Deutschland werden unterschiedlich auf Klimaänderungen reagieren. (Verändert nach KA 5 2005)

Zeit, besonders in den vergangenen 11.500 Jahren, ca. 60 unterschiedliche Bodentypen geformt (KA 5 2005). Aus Gesteinen hat sich ein komplexes und lockeres Kompartiment des Erdsystems entwickelt, die Pedosphäre, in der sich die Geo-, Hydro-, Atmo- und Biosphäre wechselseitig durchdringen. Diese bildet den Wurzel- und Lebensraum für Organismen und versorgt sie mit Nährstoffen, organischem Material, Wasser, Luft und Energie. Bodenorganismen steuern wesentliche Vorgänge in den terrestrischen Ökosystemen wie die verschiedenen Stoffkreisläufe, den Abbau und die Anreicherung organischer Substanz, den Abbau von Schadstoffen, die Stickstofffixierung sowie die Ausbildung und Aufrechterhaltung der Bodenstruktur. Die Vielfalt des Lebens im Boden ist größer als die auf dem Boden (Theuerl und Buscot 2010; Bodenatlas 2015).

Die Diversität der Böden spiegelt sich auch in den Bodenregionen in Deutschland wider (■ Abb. 20.3). Bis auf wenige Ausnahmen wie Tropen-, Wüsten- oder Permafrostböden, die nur als Relikte auftreten, kommen in Deutschland fast alle Bodeneinheiten der Erde vor: von Rohböden aus unterschiedlichsten Gesteinen bis hin zu Relikten komplexer Paläoböden aus alten tertiären, tropisch verwitterten Gesteinen. Deshalb ist immer auch eine regionale Analyse und eine standortdifferenzierende Betrachtung der Klimawirkung auf Deutschlands Böden notwendig (siehe z. B. Engel und Müller 2009; Eschenbach

und Pfeiffer 2011; MUNLV NRW 2011). Aufgrund ihrer unverzichtbaren Funktionen und Leistungen gilt es in Deutschland, die Bodenvielfalt auch unter veränderten Klimabedingungen zu erhalten.

20.2 Böden im Klimasystem: Funktionen und Ökosystemdienstleistungen

Zwar wurden schon früh die Auswirkungen des Klimawandels auf Böden und ihre Funktionen untersucht (Brinkmann und Sombroek 1996; Lal et al. 1998; Scharpenseel und Pfeiffer 1998), aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den Bodenbildungsfaktoren beschrieb man aber mithilfe von Modellen nur die Qualität der Auswirkungen (Kersebaum und Nendel 2014; Kamp 2007; Trnka et al. 2013). Bis heute bleibt weitgehend unklar, wie groß die Folgen sein werden. Messungen oder Langzeitbeobachtungen sind rar (Pfeiffer 1998; Blume und Müller-Thomsen 2008; Varallyay 2010; Hüttel et al. 2012; Vanselow-Algan 2014) oder fehlen.

Eine grundlegende Schwierigkeit besteht darin, dass die Witterungsfaktoren, denen die Böden ausgesetzt sind, bereits in der Vergangenheit und auch gegenwärtig variieren und eine erhebliche Schwankungsbreite aufweisen. Dies macht eine genaue

Analyse der in der Vergangenheit aufgetretenen Muster sowie der Klimaprojektionen erforderlich, um so die Unterschiede zu den Bedingungen, an die die Ökosysteme angepasst sind, zu quantifizieren. Diese Schwierigkeit erfordert eine intensivere Befassung mit den klimabedingten Bodenveränderungen, als dies bisher der Fall war.

Der Boden als Naturkörper bildet ein effektives, aber träges Puffersystem, das sich beispielsweise von Belastungen nur langsam erholt. Böden haben ein langes Gedächtnis. Über den Boden sind lokale, regionale und globale Stoffkreisläufe miteinander verbunden. Böden ermöglichen nicht nur Pflanzenwachstum unter wechselnder, teilweise extremer Witterung, sondern auch Wechselwirkungen mit dem Untergrund und der Atmosphäre. All dies legt nahe, dass sich Klimaänderungen direkt auf Böden auswirken werden, auf ihre Qualität und ihre Ökosystemdienstleistungen sowie auf die globalen biogeochemischen Kreisläufe. Wie der Klimawandel die Kreisläufe beeinträchtigt, wurde bisher noch nicht umfassend analysiert.

20.2.1 Folgen für die natürlichen Standortfunktionen von Böden

Ändert sich das Klima wie projiziert, steigen die Temperaturen und die Verdunstung, die Häufigkeit trockener Sommer nimmt zu; im Herbst und Winter dagegen gibt es mehr Niederschläge, und auch Starkregen treten häufiger auf (■ Tab. 20.1). Auch wenn die derzeitigen Modelle noch mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, greifen die Folgen eines Klimawandels in alle Funktionen des Bodens ein. Besonders Böden mit Grund- und Staunässe wie Marschen und Auen in den Küsten- und Flussniederungen sowie die Moore werden durch geänderte Wasser- und Energiehaushalte ihre Standorteigenschaften und damit ihre Ökosystemdienstleistungen verändern oder gar verlieren. In Hochmooren, deren Hydrologie durch den Niederschlag gesteuert wird, werden sich z. B. die Wachstumsbedingungen für die dort angepasste Vegetation verschlechtern, wenn es im Sommer weniger regnet (Vanselow-Algan et al. 2015).

Steigt klimabedingt der Meeresspiegel, kann auch das Grundwasser im Küstenbereich steigen, und die Bodenfeuchte ändert sich. Weiter kann dies zum Eindringen von Salz in den Wurzelbereich der Pflanzen führen. Das hat Folgen etwa für Trockenrasengesellschaften, die natürliche Bodenfruchtbarkeit von Marschenböden oder die Ausgleichfunktion von Auenlandschaften im Bereich der küstennahen Flüsse. In diesen Regionen ist mit erheblichen Verlusten der Bodenvielfalt und -funktionen zu rechnen.

Mittels bodenkundlicher Feldanalysen in sensiblen Regionen lassen sich Prognosen entwickeln und Modelle überprüfen. Daraus können regionale Anpassungs- und Vermeidungsstrategien für schutzbedürftige Ökosysteme und ihre Böden abgeleitet werden. Dabei wird auch die Ertragsfähigkeit der genutzten Böden in Deutschland berücksichtigt (Jensen et al. 2011).

Aktuelle Untersuchungen zur Sommertrockenheit in Mooren und in anderen Ökosystemen zeigen, dass gute Feldtechniken vorhanden sind, um die Klimawirkungen auf Böden zu erfassen. Allerdings müssen die Klimawirkungen gezielt und in Langzeit-

studien ermittelt werden (Vanselow-Algan et al. 2015). Dabei sind insbesondere die bestehenden Dauerbeobachtungsflächen der Bundesländer einzubeziehen, die die unterschiedlichen regionalen Einflüsse abbilden.

■ Änderungen der Nutzungsfunktionen von Böden

Böden stellen die Standorte für Nahrungs-, Futter-, Energie- und Holzpflanzen dar. Rund 90% unserer Lebensmittel stammen weltweit aus der Agrarpflanzenproduktion (Godfray et al. 2010). Nach Angaben der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) erfordert allein das Wachstum der Weltbevölkerung auf mehr als 9 Mrd. Menschen bis zum Jahr 2050 eine Ertragszunahme in der Landwirtschaft um 70% (► Kap. 18). Dabei sind Flächen berücksichtigt, die erst noch in die Agrarproduktion integriert werden müssen (Vance et al. 2003). Die politisch geförderten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel führen außerdem dazu, dass man auf immer mehr Flächen Energiepflanzen und Pflanzen für die Produktion von Biokraftstoffen zulasten wertvoller Standorte der Nahrungsmittelproduktion anbaut. Somit sind die Erträge der Nahrungsmittelproduktion pro Fläche deutlich zu erhöhen und dies unter teilweise ungünstigeren Klimabedingungen. Gleichzeitig gilt es, die weiteren Dienstleistungen der Böden und Agrarökosysteme zu erhalten sowie die Umweltbelastungen zu verringern (Tilman et al. 2002).

Sommertrockenheit beeinträchtigt über den Wasserhaushalt der Böden die Pflanzenproduktion, da aufgrund mangelnder Wasserzufuhr die Fotosynthese der Pflanzen reduziert wird. Das wirkt sich auf die natürliche Ertrags- und Funktionsfähigkeit der land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden aus (► Kap. 18 und 19). Der Wasservorrat im Boden bestimmt letztlich, wie viel Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht (► Kap. 16). Frühjahrs- und Sommertrockenheit mit Wassermangel in den Oberböden während der Hauptvegetationszeit verringert auch die Nährstoffverfügbarkeit in den Böden. Ist wenig Wasser im Boden, führen Düngemaßnahmen nicht zum gewünschten Ziel, denn die Pflanzen nehmen die Nährstoffe schlechter auf, wodurch die Ertragsunsicherheit steigt (Olde Venterink et al. 2002). Zudem waschen zunehmende Herbst- und Winterniederschläge verstärkt nicht genutzte Düngernährstoffe aus. Diese geänderte Nährstoffdynamik erhöht z. B. das Risiko einer erhöhten Nitrat- und Phosphatauswaschung in das Grundwasser und trägt damit zur Verschlechterung unserer Trinkwasserqualität bei. Solche klimabedingten Effekte sind regional sehr unterschiedlich ausgeprägt und erfordern regionale bodenkundliche Feldstudien (Engel und Müller 2009).

Was bislang kaum wahrgenommen wird: Viele Agrarböden sind durch extreme Witterungsereignisse verstärkt dem Bodenabtrag (Erosion) ausgesetzt, wenn sie aufgrund von Wassermangel nach der Ernte ohne Nach- oder Zwischenfrucht bleiben und somit die schützende Vegetationsdecke fehlt. Bereits jetzt kommt es bei wiederholt heftigen Niederschlägen zur Bodenzerstörung durch Erosion (■ Tab. 20.1).

Wärmere Sommertemperaturen verstärken auch in feuchten Böden den Abbau der organischen Substanz und damit die CO₂-Emissionen. Dadurch können sich in Waldböden die organischen Auflagen verringern und die Humusformen nachteilig verändern. Außerdem können trockenstressempfindliche Baumarten wie die Fichte (*Picea abies*) in einigen Regionen

■ Tab. 20.1 Wesentliche zu erwartende Auswirkungen von erwarteten Klimaänderungen auf Böden in Deutschland sind mit hohen Unsicherheiten verbunden

Auswirkungen auf verschiedene Bodenfunktionen und -gefährdungen	Klimaänderungen					
	Temperaturanstieg, längere Sommer, kürzere Winter	Abnahme Sommerniederschläge	Zunahme Winter-niederschläge	Zunahme extremer Niederschläge	Zunahme extremer Stürme	Meeresspiegelanstieg
Bodenbildung, Bodendiversität						
Diversität der Bodenorganismen						
Produktion Nahrung, Holz, Futter						
Produktion erneuerbarer Energien						
Wasserspeicher, Grundwasserneubildung						
Regulation Nährstoffkreislauf						
Kohlenstoffspeicherung						
Abkühlungsfunktion in Städten						
Schadstoffabbau und -pufferung						
Erosion durch Wind						
Erosion durch Wasser						
Zunahme zu erwarten Abnahme zu erwarten In Abhängigkeit von Standortbedingungen: Zu- oder Abnahme zu erwarten Zu- oder Abnahme zu erwarten: Effekt unterschiedlicher Ausprägung			Durch indirekte Wirkungen: Zunahme möglich Durch indirekte Wirkungen: Abnahme möglich Durch indirekte Wirkungen in Abhängigkeit von Standortbedingungen: Zu- oder Abnahme möglich			

ausfallen (► Kap. 19), wobei jedoch die Bewirtschaftungsform die künftige Waldstruktur am meisten beeinflussen wird (Köhl et al. 2010).

Aktuelle Modellrechnungen zur Wirkung des Klimawandels auf die Produktion von Nahrungsmitteln zeigen große Unsicherheiten (Asseng et al. 2013). Da das regionale Klima bei der Beur-

teilung der Produktionsfunktion von Böden eine Schlüsselrolle spielt, ist es erforderlich, die Regionalisierung der Klimamodelle voranzutreiben und diese mit Wirkmodellen zu verknüpfen. Dies ist für die Land- und Forstwirtschaft besonders wichtig, um so die klimaempfindlichen Gebiete in Deutschland zu identifizieren und Anpassungsmaßnahmen vorzuschlagen.

20.2.2 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt

Das im Oberboden gespeicherte Wasser ist von besonderer Qualität: Als „grünes Wasser“ bestimmt es, wie viel Wasser die Pflanzen und Mikroorganismen nutzen, speichern und über die Verdunstung wieder an die Atmosphäre abgeben können. Es ist eben mehr als „blaues“, also See, Fluss- und Grundwasser, oder „graues“ Brauchwasser (► Kap. 16).

Die Witterung beeinflusst zum einen direkt den aktuellen Wasservorrat im Boden. Bei Sommertrockenheit und gleichzeitig hohen Temperaturen dringt weniger Wasser in den Boden ein, gleichzeitig verdunstet mehr Wasser. Somit verfügen die Pflanzen über weniger Bodenwasser, und das Grundwasser kann absinken (Bräunig und Klöcking 2008). Das gefährdet den Ertrag, sodass Agrarflächen künftig mehr beregnet oder vermehrt wassersparende Kulturen angebaut werden müssen (Engel und Müller 2009).

Zum anderen beeinflusst das Klima indirekt den Wasserhaushalt: Die stärkeren Niederschläge in den vegetationsfreien Jahreszeiten fließen infolge von Verdichtungen und Verschlammungen verstärkt als Oberflächenwasser ab, da sie nicht mehr vollständig in den Boden eindringen (herabgesetzte Infiltration). Dies führt zu einem erhöhten Bodenabtrag. Das erodierte Bodenmaterial ist unwiederbringlich verloren. Der Effekt ist besonders negativ zu bewerten, da es die nährstoffreichen Oberböden betrifft. Darüber hinaus werden klimabedingte Vegetationsänderungen und deren Rückkopplungen den Bodenwasserhaushalt beeinflussen (Seneviratne et al. 2010; Varallyay 2010); zum Beispiel führte eine verminderte Vegetationsbedeckung auf Lössböden zu erhöhtem Bodenverlust infolge von Wassererosion.

Zunehmendes Sickerwasser im Winter wäscht Nähr- und Düngestoffe stärker aus, vor allem Nitrat und Phosphat. Im nordostdeutschen Tiefland kann der Klimawandel dazu führen, dass der Wasserüberschuss im Winter die zunehmenden Sommerwasserdefizite nicht ausgleichen kann. Das führt dazu, dass zur Gewinnung von Trinkwasser neue Grundwasserreserven erschlossen werden müssen. In den Gewinnungsgebieten ist dies immer mit einem weiteren Absinken der ohnehin begrenzten Grundwasservorräte verbunden. Weiter verstärkt sich die Winderosion, wenn die Oberböden der sandigen Böden stärker austrocknen.

Die Folgen eines geänderten Bodenwasserhaushalts sind klar: Mehr Wasser und gleichzeitig höhere Temperaturen im Herbst und Frühjahr führen in einigen Regionen Deutschlands dazu, dass organische Substanz verstärkt abgebaut wird und dadurch mehr CO₂ in die Atmosphäre gelangt. In anderen Gebieten droht ein Wasserüberangebot in Böden den Abbau organischen Materials.

Böden steuern die Wasser-, Energie- und Nährstoffhaushalte in unseren Landschaften. Jedoch fehlt bislang eine quantitative Abschätzung der möglichen Folgen des Klimawandels. Besonders betroffene Gebiete zu identifizieren, die Empfindlichkeit der natürlichen Bodenfunktionen zu bewerten, die zeitlichen Änderungen der Bodenparameter zu berücksichtigen (■ Tab. 20.2) und einen geeigneten vorsorgenden Bodenschutz unter Berücksichtigung des Klimawandels zu entwickeln und umzusetzen stellt eine große Herausforderung dar.

20.2.3 Böden und ihre unverzichtbaren Klimafunktionen

Es ist keine einseitige Angelegenheit: Wie das Klima die Böden verändert, so wirken die Böden auch auf das Klima. Die Wechselwirkungen sind jedoch komplex und bisher nur unzureichend untersucht (Varallyay 2010).

■ Senke und Quelle für klimarelevante Spurengase

Böden speichern erhebliche Mengen an organischem Material und fungieren damit als Senken für Kohlenstoff und Stickstoff. Bodennutzung und -bewirtschaftung beeinflussen die Freisetzung und Bindung von CO₂. Nimmt der Humusgehalt im Boden zu, leistet der Boden als Kohlenstoffsenke (C-Sequestrierung) einen Beitrag zur Minderung des Treibhausgases CO₂ in der Atmosphäre und wirkt damit der Erwärmung entgegen. Durch sauerstofffreien (anaeroben) Kohlenstoffumsatz in den Böden der Feuchtgebiete und in Deponien gelangen Spurengase in die Atmosphäre, besonders Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O) – die Böden fungieren hier also als Quelle für Treibhausgase (Pfeiffer 1998; Vanselow-Algan et al. 2015). Die Moore, die grundwasserbeeinflussten Flussmarschen und Auen sowie die nassen Gleye haben große Speicher-, aber auch Freisetzungspotenziale und können bei angepasster Nutzung die Treibhausgasbilanzen verbessern (► Kap. 17).

In den Bodenbereichen mit Sauerstoff kann Methan, das aus der bodennahen Atmosphäre oder aus anaeroben Bodentiefen stammt, wieder oxidiert werden. Böden fungieren somit auch als natürliche Methansenken. Diese Bodenfunktion nutzt man beispielsweise bei der biologischen Methanoxidation in Bodenabdeckungen auf Deponien (Gebert et al. 2011).

Der Klimawandel wird sich auch auf unsere Waldökosysteme und deren Klimafunktion auswirken; sowohl die Artenzusammensetzung der Wälder als auch die Kohlenstoffspeicherungsfunktion sind betroffen. Es ist anzunehmen, dass die Senkenfunktion der Waldböden im Kohlenstoffhaushalt bedingt durch klimatische Veränderungen zurückgehen wird (► Kap. 19).

Eine umfassende Abschätzung der Quellen- und Senkenfunktion von Feuchtböden in Deutschland gibt es derzeit nicht. Ebenso fehlt eine standortspezifische Bilanzierung der Menge, Qualität und Umsetzbarkeit von Kohlenstoff in Böden unterschiedlicher Regionen (Hüttel et al. 2012). Diese Informationen sind aber notwendig, um eine nachhaltige Flächennutzung und ein angepasstes Flächenrecycling zu ermöglichen.

Auch zu Agrarböden mangelt es noch an Wissen (► Kap. 18). Um Ertrag und Qualität der Nahrung zu sichern, brauchen die Böden Stickstoff, mit der unweigerlichen Bildung von Lachgas. Aber wie sieht die N₂O-Bilanz aus? Mit welcher Art von Bewirtschaftung lassen sich N₂O-Emissionen verringern? Hier besteht Forschungsbedarf (Fuss et al. 2011; Küstermann et al. 2013).

■ Kühlfunktion des Bodens

Da unsere Böden Wasser- und Energieflüsse regulieren, sorgen sie auch für Abkühlung. Sowohl der Boden als auch die Pflanzen verdunsten Wasser. Damit beeinflusst der Boden den Wärmehaushalt der bodennahen Atmosphäre und das lokale Klima. Die Verdunstung verbraucht Energie und verringert somit die

■ **Tab. 20.2** Zeitliche Dimensionen der Änderungen von Bodenparametern durch den Klimawandel in Deutschland

Zeitskala (Jahre)	Bodenparameter mit Relevanz für klimabezogene Veränderungen in Deutschland
<0,1	Temperatur, Wassergehalt, Lagerungsdichte, Gesamtporosität, Infiltration, Durchlässigkeit, Zusammensetzung der Bodenluft, Nitratgehalt etc.
0,1–1	Gesamtwasserkapazität, nutzbare Feldkapazität, Wasserleitfähigkeit, Nährstoffstatus, Zusammensetzung der Bodenlösung
1–10	Intensität der Wasserbindung am Welkepunkt, Bodensäure, Kationenaustauschkapazität (KAK), austauschbare Kationen, Biofilme
10–100	Spezifische Oberflächen, Zusammensetzung von im Boden gebildeten Tonmineralen, Gehalt an organischer Substanz (SOM)
100–1000	Primäre Mineralzusammensetzung, chemische Zusammensetzung der Mineralkomponenten
>1000	Textur, Körnungsverteilung, Dichte/Struktur des Ausgangsmaterials

Umwandlung der eingestrahnten Energie in Wärme. Modellhafte Berechnungen verdeutlichen den Einfluss der Wechselwirkungen von Boden und Atmosphäre auf die Lufttemperatur (Jaeger und Seneviratne 2011). Das Netzwerk *Terrestrial Environmental Observatories* (TERENO) untersucht, wie sich der Klimawandel und die Landnutzung in Deutschland auf die Wechselwirkungen von Boden und Vegetation und die untere Atmosphäre auswirken (Zacharias et al. 2011). Belastbare Befunde aus diesen Analysen, die in ein praxisrelevantes Handlungskonzept einfließen können, liegen noch nicht vor.

Besonders in der Stadt ist diese Kühlfunktion der Böden wichtig, die beispielhaft in dem Projekt HUSCO für Hamburg untersucht wird (Wiesner et al. 2014). Jedoch beeinträchtigt die Versiegelung in den Städten die natürlichen Klimafunktionen des Bodens, denn dadurch dringt weniger Wasser in den Boden ein, und es fließt mehr über die Oberfläche ab. Das verhindert den Austausch zwischen Boden und Atmosphäre (Wessolek et al. 2011; Jansson et al. 2007). Versiegelte Böden und auch stark verdichtete Oberböden können ihre Kühlungsfunktion in der Stadt nicht mehr ausüben. Umso wichtiger ist der nachgewiesene Kühlungseffekt städtischer Grünanlagen und Parks durch Verdunstung (Lee et al. 2009; ► Kap. 22).

Weniger berücksichtigt ist bisher, dass die Kühlfunktion der Böden generell vom Wasserhaushalt des Bodens, der Wasserverfügbarkeit und Nachlieferung des Wassers gesteuert wird, wie das auch Modellberechnungen bestätigen (Goldbach und Kuttler 2012). Die Differenz zwischen Erdoberfläche und Grundwasserspiegel, der Flurabstand, von zwei bis fünf Metern ist nach Modellberechnungen besonders bedeutend für diese Kühlungsleistung (Maxwell und Kollet 2008).

Stadtböden weisen verschiedene Flurabstände auf und sind sehr unterschiedlich zusammengesetzt, da sie einerseits aus technogenen, andererseits aus natürlichen Substraten bestehen. Messungen der Klimafunktion von Stadtböden an ausgewählten Standorten in Hamburg zeigen: Die tägliche Erwärmung der Luft ist zu 11–17 % auf unterschiedliche Wassergehalte des Oberbodens zurückzuführen (Wiesner et al. 2014).

Wie Stadtböden nun aber die Ausbildung des kleinräumigen Klimas in der Stadt beeinflussen, lässt sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Beschaffenheit nicht anhand von einfachen bodenphysikalischen Grundgrößen ermitteln. Die Kühlfunktion des Bodens in der Stadt wird beeinflusst durch Boden- und Flächennutzung (etwa Parks und Grünanlagen

im Verhältnis zu bebauten Flächen), Versiegelungsart und -grad, Niederschlagsmenge und -verteilung sowie das Bodenwasserspeichervermögen, den Flurabstand und die Wassernachlieferung in den oberflächennahen Wurzelraum und zur Verdunstungsoberfläche. Es besteht Forschungsbedarf, um die Klimaänderung durch Böden in der Stadt zu charakterisieren (Eschenbach und Pfeiffer 2011). Dies würde auch differenzierte Aussagen zur Klimafunktion von Böden bei unterschiedlicher Nutzung und die Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel ermöglichen.

■ Standort für erneuerbare Energie

Unsere Böden sind ein wichtiger Faktor bei der Produktion erneuerbarer Energien: Sie dienen Windrädern als Standort, Biogaspflanzen und weiteren nachwachsenden Energierohstoffen wie etwa Holz als Produktionsfläche. Dadurch können die Verbrennung fossiler Energieträger und die Emission von Treibhausgasen aus der Landwirtschaft verringert werden. Allerdings ist diese Klimaschutzfunktion der Böden kritisch abzuwägen: Neben dem bereits erwähnten hohen Flächenbedarf und der damit verbundenen Flächenkonkurrenz für die Nahrungsmittelproduktion sind direkte Folgen für die Böden zu erwarten. Die Ernte von großen Massen an frischem, schwerem Pflanzmaterial für die Biogasreaktoren und Heizwerke erfordert den Einsatz sehr schwerer Ernte- und Transportmaschinen. Dadurch wird der Boden bis weit unter die Pflugtiefe verdichtet. Durch die projizierten höheren Niederschläge im Herbst und Frühjahr wird dieser Prozess verstärkt. Das stört nachhaltig viele Bodenfunktionen, etwa die Lebensraumfunktion und die Wasserinfiltration und -speicherkapazität, weil die wasser- und luftführenden groben und mittleren Poren verringert werden.

Wenn man schnellwüchsige Energiepflanzen anbaut, diese energetisch nutzt und Gärreste aus Biogasanlagen wieder auf die Felder bringt, hinterlässt das langfristig Spuren im Nährstoff- und Kohlenstoffkreislauf sowie in der Gefügestabilität der Böden. Dies kann wiederum die Bodenverdichtung verstärken und damit die Ertragsfähigkeit verringern. Trotz der bereits laufenden Forschungsprojekte des BMBF bedarf es dringend weiterer Bewertungen zu Auswirkungen der Produktion von Energiepflanzen auf die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften sowie die Humusbilanz von Böden in den verschiedenen Regionen Deutschlands, insbesondere unter den sich ändernden Klimabedingungen.

20.3 Klima- und Bodenschutz zum Erhalt der Ressource Boden

Der Klimawandel wird künftig verstärkt die Formen der Landnutzung und Bewirtschaftung verändern. Neben den zunächst positiv erscheinenden Effekten wie z. B. die Erhöhung der mikrobiellen Aktivität oder die Veränderung der Qualität der organischen Substanz wird dies in den Böden Deutschlands langfristig vorwiegend negative Effekte hinterlassen, wenngleich regional unterschiedlich stark (BMU 2013). Das Spektrum der Bodengefährdung reicht von wenig auffälligen Funktionseinschränkungen bis hin zum vollständigen Verlust an nutzbarer Bodenoberfläche (WBGU 1994; Bodenatlas 2015). Viele der möglichen Auswirkungen hängen vom Bodentyp, von den einzelnen Standortfaktoren sowie der aktuellen Landnutzung bzw. den geplanten Landnutzungsänderungen ab (■ Tab. 20.1). In welcher Zeit sich Bodenkenngrößen verändern, ist unterschiedlich – von wenigen Tagen bis Jahrtausenden (■ Tab. 20.2).

In Deutschland sind besonders die Oberböden gefährdet. Durch Wind- und Wassererosion kann sich klimabedingt der Abtrag der wertvollen Ackerkrume verstärken und die in Jahrtausenden bis Jahrmillionen entstandenen fruchtbaren Oberböden vernichten. Außerdem lässt sich derzeit nicht annähernd einschätzen, wie sich genetisch veränderte Gärreste aus Biogasreaktoren, die wegen der hohen Nährstoffgehalte als „Dünger“ wieder auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden, auf die Mikroorganismengemeinschaften und die Biodiversität im Boden auswirken. Ebenso setzen Schadstoffe den belebten Oberböden zu. Gesunde Böden beherbergen eine Vielfalt an Bodenorganismen. Geht diese verloren, sinken Bodenqualität und -fruchtbarkeit. Dies kann durch klimabedingte Änderungen der Temperatur und Niederschläge verstärkt werden.

Die deutsche Anpassungsstrategie der Bundesregierung an den Klimawandel (DAS 2008) berücksichtigt besonders den Boden als eigenständiges Ökosystem und stellt die hohe Gefährdung der Böden und Maßnahmen zur Vorsorge dar. Im Mittelpunkt stehen Agrarböden und die Prognose großräumiger, langjähriger Bodenverluste. Die Ergebnisse von Szenarien zur Bodenerosion zeigen, welche Unsicherheiten heute noch bei den Klimafolgenbewertungen bestehen: Während sich von 2011 bis 2040 die Erosionsgefahr großflächig zunächst kaum verändert, steigt zwischen 2041 und 2070 die Erosionsgefahr im Westen und Nordwesten Deutschlands, und bis 2100 verstärkt sich der Bodenverlust auch in anderen Regionen (Jacob et al. 2008). Dagegen zeigen andere Modellrechnungen, dass zunächst die Niederschlagsmengen pro Tag als Starkregen in den ost- und süddeutschen Bundesländern zwischen 2041 und 2070 sinken und dann bis zum Jahr 2100 auch diese Landesteile einer höheren Erosionsgefahr ausgesetzt sind (Spekat et al. 2007). Als Ursache wird hierbei insbesondere die fehlende schützende Pflanzenbedeckung der Böden in den Winter- und Frühjahrsmonaten genannt. Die aktuellen regionalen Modelle zur Bodenerosion müssen weiterentwickelt werden, um die räumliche und zeitliche Auflösung zu verbessern. Zudem müssten die Niederschlagsereignisse intensiver beobachtet werden, was eine Verdichtung des Messnetzes erfordert. Mit anderen Worten: Wir stehen erst am Anfang bei der Erstellung belastbarer Prognosen als Grund-

lage für künftige Bodenschutzmaßnahmen. Das Hauptproblem besteht in der Abschätzung von Starkregenereignissen und Stürmen, die die Erosion von Boden auslösen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Klimaforschern, Meteorologen und Bodenwissenschaftlern.

In Gebieten mit hoher Erosionsgefahr wendet man bereits abgeleitete Handlungsstrategien an. Sie stützen sich zum einen auf die konservierende Bodenbearbeitung, die die Gefügestabilität unserer Böden fördert. Zum anderen zielen sie darauf ab, die schützende Bodenbedeckung möglichst ganzjährig aufrechtzuerhalten. Dies wird jedoch bei abnehmenden sommerlichen Niederschlägen und auf Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität zunehmend schwieriger. Auch hier müssen die Modelle verbessert werden, da sie die Gefügestabilität des Bodens bisher nur unzureichend abbilden.

Neben den Veränderungen von Niederschlägen und Temperatur beeinflusst auch die aktuelle Erhöhung der CO₂-Konzentrationen die Landökosysteme, denn der Energie- und Stoffeintrag in die Böden erfolgt vor allem über die Vegetation. Wie wirken sich also höhere CO₂-Konzentrationen auf Pflanzen, auf mikrobiologische Prozesse im Boden und schließlich auf die Qualität der organischen Bodensubstanz aus? Höhere CO₂-Konzentrationen verstärken bei den sogenannten C₃-Pflanzen wie Getreide und Hackfrüchten die Fotosynthese und verbessern das Pflanzenwachstum. Dafür verbrauchen die Pflanzen unter diesen Bedingungen aber weniger Wasser, sodass der Boden weniger austrocknet. Ebenso sinkt der Proteingehalt der C₃-Pflanzen (Stafford 2007). Der mikrobielle Abbau dieser Pflanzenreste könnte die Humusqualität und Gefügestabilität unserer Böden verändern. Systematische Untersuchungen dazu gibt es bisher jedoch nicht, da bei Agrarpflanzen meistens nur der Stickstoffgehalt gemessen wird. Es bedarf einer Analyse der Bestandsabfälle, die dem Boden zugeführt werden. Dabei genügt es nicht, Gesamtgehalte von Nährstoffen zu bestimmen, sondern auch die wichtigsten organischen Stoffgruppen und deren Veränderung sind zu betrachten.

Die oben genannten Bodenveränderungen, insbesondere der Gefügestabilität und der Wasserspeichereigenschaft, sollten bei künftigen Abschätzungen der Erosion in den Modellen berücksichtigt werden. Künftige Prognosen zur Bodenerosion könnten realistischer ausfallen, wenn die bestimmenden Erosionsfaktoren wie die Krafteinwirkung durch Niederschläge auf die Bodenoberfläche und der damit einhergehenden Verlusts an wertvollem Oberboden in den Modellen berücksichtigt würden.

Eine weitere Gefahr für Böden ist die Versiegelung. Bebaute und versiegelte Böden können ihre Funktionen im Erd- und Klimasystem nicht mehr erfüllen. Aktuell liegt der sogenannte Flächenverbrauch für ganz Deutschland im vierjährigen Mittel bei etwa 104 ha pro Tag. Der weitere Verbrauch von Böden sollte verringert werden. Deshalb hat die Bundesregierung das 30-Hektar-pro-Tag-Ziel bis zum Jahr 2020 formuliert. Das heißt: Bis 2020 dürfen pro Tag nicht mehr als 30 ha Fläche dem Bau von Siedlungen und Verkehrswegen zum Opfer fallen (KBU 2009).

Auf der einen Seite wird die zunehmende sommerliche Trockenheit in bestimmten Regionen die natürlichen Wasservorräte weiter verringern und die Neubildung von Grundwasser

reduzieren, wie dies z. B. für die mitteldeutschen Trockengebiete gezeigt wurde (Naden und Watts 2001). Außerdem werden sich unsere wertvollsten Böden in Deutschland mit höchster natürlicher Ertragsfähigkeit, die Schwarzerden aus Löss, weiter verschlechtern. Auf der anderen Seite ist in den Niederungsgebieten Deutschlands mit verstärkten Überflutungen (Morris et al. 2002) und zunehmender Bodenvernässung zu rechnen, wodurch viele ackerfähige Böden ggf. verlorengehen.

Wie sich Klimaänderungen auf die Böden auswirken können, wurde vielfach beschrieben. Ihre Quantifizierung ist jedoch noch unzureichend. Dies hat seine Ursache in der Vielfalt der Böden und der in ihnen ablaufenden Prozesse. Erschwert wird die Quantifizierung dadurch, dass die Wirkungen des Klimawandels durch mögliche Rückkopplungseffekte in den Böden zeitlich verzögert auftreten. Erschwerend kommt hinzu, dass sich bisher nur direkte Einflüsse auf Böden beobachten und modellieren lassen, nicht aber die langfristigen Effekte (Emmett et al. 2004). Zusätzlich sind die bisherigen Modellergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet, was sowohl an Unsicherheiten der Klimaprojektionen und ihrer Regionalisierung als auch an Unsicherheiten und Mängeln bei der Parametrisierung von Bodengrößen liegt (Asseng et al. 2013).

20.3.1 Strategien und Herausforderungen

In Deutschland trägt die Gesellschaft Verantwortung für den nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen Boden, Wasser und Luft. Der Klimawandel wirkt sich in vielfältiger Weise auf die Böden aus. Bislang liegen nur wenige mehrjährige Beobachtungen und Messdaten vor, um einerseits die durch den Klimawandel bewirkten Veränderungen zu quantifizieren und andererseits Wirkmodelle anhand der Messreihen zu kalibrieren oder zu validieren. Um geeignete Handlungsempfehlungen ableiten zu können, bedarf es daher verstärkter Anstrengungen auf diesen Gebieten. Zunehmend müssen neben den globalen Auswirkungen des Klimawandels verstärkt nationale, regionale und lokale Analysen durchgeführt werden. Wir brauchen Strategien, die unter sich wandelnden Klimabedingungen den Struktur- und Funktionsverlust der Böden ebenso verhindern wie den Flächenverbrauch, den Rückgang der Biodiversität sowie die Vernichtung der Bodenvielfalt verringern.

Geeignete Werkzeuge zur Bewertung von Böden, besonders hinsichtlich ihrer Leistungen für Umwelt, Natur und Gesellschaft, sowie der Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Ökosystem Boden müssen weiterentwickelt werden, damit ihre Anwendbarkeit erweitert wird und nicht auf einige ökologische Funktionen unserer Böden begrenzt bleibt (Fromm 1997; Robinson et al. 2009). Zukünftig müssen Methoden entwickelt werden, mit denen sich klimabedingte Bodenveränderungen, Langzeitschäden sowie die Reduzierung von Ökosystemdienstleistungen von Böden auch ökonomisch abschätzen lassen (Gambarelli 2013; Hedlund und Harris 2012; Whitten und Coggan 2013). Nur so wird es möglich sein, aufgrund von Kosten-Nutzen-Analysen adäquate Maßnahmen zu entwickeln, um klimabedingten Leistungs- und Funktionsminderungen unserer Böden entgegenzuwirken.

20.4 Kurz gesagt

Die Risiken für die Böden in Deutschland infolge des Klimawandels lassen sich zwar qualitativ anhand der ersten vorliegenden Abschätzungen und Modellierungen ableiten, jedoch nur schwer quantitativ fassen. Ebenso erlauben die wenigen Feldmessungen zur Änderung der Bodenfeuchte und Temperatur nur begrenzt Aussagen darüber, wie hoch diese Risiken sind. Durch den Klimawandel am meisten gefährdet ist die Produktionsfunktion von Böden, insbesondere durch regional unterschiedlich zunehmende Vernässung oder Austrocknung, durch verstärkte Bodenerosion und damit durch den Verlust des nährstoffreichen Oberbodens und des verfügbaren Wassers. Der vermehrte Abbau der organischen Substanz sowie abnehmende Nährstoffreserven kommen noch hinzu. Hinsichtlich der natürlichen Standortfunktionen muss mit abnehmender Biodiversität und Bodenvielfalt gerechnet werden. Die geänderten Klimafunktionen von Böden bringen das Senken-Quellen-Verhältnis aus dem Lot: Der Boden speichert weniger Kohlenstoff und setzt bei Verringerung der belüfteten Oberböden mehr klimarelevante Spurengase frei. Insgesamt zeichnen sich negative Folgen des Klimawandels ab, die langfristig mit dem Verlust lebenswichtiger „Dienstleistungen“ unserer Böden einhergehen.

Literatur

- Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, Boote KJ, Thorburn PJ, Rötter RP, Cammarano D, Brisson N, Basso B, Martre P, Aggarwal PK, Angulo C, Bertuzzi P, Biernath C, Challinor AJ, Doltra J, Gayler S, Goldberg R, Grant R, Heng L, Hooker J, Hunt LA, Ingwersen J, Izaurralde RC, Kersebaum KC, Müller C, Naresh Kumar S, Nendel C, O'Leary G, Olesen JE, Osborne TM, Palosuo T, Priesack E, Ripoche D, Semenov MA, Shcherbak I, Steduto P, Stöckle C, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Travasso M, Waha K, Wallach D, White JW, Williams JR, Wolf J (2013) Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nat Clim Chang* 3:827–832
- BBodSchG (1998) Gesetz zum Schutz des Bodens. BGBl. I, G 5702 16 24.03.2008:502–510
- Blume HP, Müller-Thomsen U (2008) A field experiment on the influence of the postulated global climatic change on coastal marshland soils. *J Plant Nutr Soil Sci* 170:145–156
- BMU (2013) Dritter Bodenschutzbericht der Bundesregierung. Beschluss des Bundeskabinetts vom 12. Juni 2013. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg)
- Bodenatlas (2015) Heinrich Böll Stiftung, IASS Potsdam, BUND, LE MONDE diplomatique
- Bräunig A, Klöcking B (2008) Klimawandel und Bodenwasserhaushalt – Einsatz eines Simulationsmodells zur Abschätzung der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt von Böden Sachsens. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Arnd_Braeunig01.pdf. Zugegriffen: 1. Aug. 2008
- Brinkmann R, Sombroek WG (1996) The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production. In: Bazzaz F, Sombroek WG (Hrsg) *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes.* Food and Agriculture Organization of the United Nations and Wiley, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore
- DAS (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Beschluss Bundeskabinetts 17. Dezember 2008. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmuimport/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf. Zugegriffen: 3. Okt. 2015
- Emmett BA, Beier C, Estiarte M, Tietema A, Kristensen HL, Williams D, Penuelas J, Schmidt I, Sowerby A (2004) The response of soil processes to climate

- change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* 7:625–637
- Engel N, Müller U (2009) Auswirkungen des Klimawandels auf Böden Niedersachsens. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG, Hannover
- Eschenbach A, Pfeiffer E-M (2011) Bodenschutz und Klimafolgen. Expertise für die Stadt Hamburg. Unveröffentlichtes Gutachten der BSU Hamburg
- Fromm O (1997) Möglichkeiten und Grenzen einer ökonomischen Bewertung des Ökosystems Boden. Peter Lang, Frankfurt am Main
- Fuss R, Ruth B, Schilling R, Scherb H, Munch JC (2011) Pulse emissions of N₂O and CO₂ from an arable field depending on fertilization and tillage practice. *Agric Ecosys Environ* 144:61–68
- Gambarelli G (2013) A framework for the economic evaluation of soil functions. Background paper to the Swiss Soil Strategy
- Gebert J, Racher I, Gröngröft A, Pfeiffer E-M (2011) Temporal variability of soil gas composition in landfill covers. *Waste Manage* 31:935–945
- Godfray J, Beddington R, Crute I, Haddad L, Lawrence D, Muir J, Pretty J, Robinson S, Thomas S, Toulmin C (2010) Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327:812–818. doi:10.1126/science.1185383
- Goldbach A, Kuttler W (2012) Quantification of turbulent heat fluxes for adaptation strategies within urban planning. *Int J Climate* 33:143–159
- Hedlund K, Harris J (2012) Delivery of soil ecosystem services: from Gaia to Genes. Wall DH, Bardgett RD, Behan-Pelletier V, Herrick JE, Jones H, Ritz K, Six J, Strong DR, van der Putten WH (Hrsg) *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford University Press, UK
- Hüttel RF, Russel DJ, Sticht C, Schrader S, Weigel H-J, Bens O, Lorenz K, Schneider B, Schneider BU (2012) Auswirkungen auf Bodenökosysteme. In: Mosbrugger V, Brasseur G, Schaller M, Stribrny B (Hrsg) *Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S 128–163
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008) Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. *Clim Chang*, Bd. 11. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Jaeger EB, Seneviratne SI (2011) Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Clim Dyn* 36(9–10):1919–1939
- Jansson C, Jansson PE, Gustafsson D (2007) Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings. *Theor Appl Climatol* 89:185–193
- Jensen K, Härdtle W, Pfeiffer E-M, Meyer-Grünefeldt M, Reisdorff C, Schmidt K, Schmidt S, Schrautzer J, von Oheimb G (2011) Klimabedingte Änderungen in terrestrischen und semiterrestrischen Ökosystemen. In: Von Storch H, Claussen M: *Klimabericht der Metropolregion Hamburg*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, S 189–236
- KA 5. Bodenkundliche Kartieranleitung (2005). Ad-hoc-AG Boden, BGR Hannover
- Kamp T, Choudhury K, Ruser R, Hera U, Rötzer T (2007) Auswirkungen von Klimänderungen auf Böden – Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen. <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/veranstaltungen/ws080122/index.htm>. Zugriffen: 5. Januar 2014
- KBU – Kommission Bodenschutz bei Umweltbundesamt (2009) Flächenverbrauch einschränken – jetzt handeln – Empfehlungen der Kommission Bodenschutz bei Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Kersebaum KC, Nendel C (2014) Site-specific impacts of climate change on wheat production across regions of Germany using different CO₂ response functions. *Eur J Agronomy* 52:22–32
- Köhl M, Hildebrandt R, Olschofsky K, Köhler R, Rötzer T, Mette T, Pretzsch H, Köthke M, Dieter M, Abiy M, Makeschin F, Kenter B (2010) Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. *Carbon Balance and Management* 5(8). doi:10.1186/1750-0680-5-8
- Küstermann B, Munch JC, Hülsbergen K-J (2013) Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany. *Eur J Agron* 49:61–73
- Lal R, Kimble J, Follett R, Stewart B A (Hrsg.) *Soil processes and C cycles*. Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, FL
- Lee S-H, Lee K-S, Jin W-C, Song H-K (2009) Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landsc Ecol Eng* 5(2):183–191
- Maxwell RM, Kollet SJ (2008) Interdependence of groundwater dynamics and land energy feedbacks under climate change. *Nat Geosci* 1(10):665–669
- Morris JT, Sundareshwar PV, Nietch CT, Kjerfve B, Cahoon DR (2002) Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecol* 83:2869–2877
- MUNLV NRW (2011) Klimawandel und Boden. Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Naden PS, Watts CD (2001) Estimating climate-induced change in soil moisture at the landscape scale: an application to five areas of ecological interest in the UK. *Clim Chang* 49(4):411–440
- Pfeiffer E-M (1998) Methanfreisetzung aus hydromorphen Böden verschiedener naturnaher und genutzter Feuchtgebiete (Marsch, Moor, Tundra, Reisanbau). *Hamburger Bodenkd Arbeiten* 37:207
- Robinson D, Lebron I, Vereecken H (2009) On the definition of natural capital of soils: a framework for description, evaluation, and monitoring. *SSSAJ* 73(6):1904–1911
- Scharpenseel HW, Pfeiffer EM (1998) Impacts of possible climate change upon soils: some regional consequences. *Adv Geo Ecol* 31:193–208
- Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, Orlowsky B, Teuling AJ (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth-Sci Rev* 99(3–4):125–161
- Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007) Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Endbericht. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“ des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, Potsdam
- Stafford N (2007) The other greenhouse effect. *Nature* 448:526–528
- Theuerl S, Buscot F (2010) Laccases: toward disentangling their diversity and functions in relation to soil organic matter cycling. *Biol Fertil Soils* 46:215–225
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671–677
- Trnka M, Kersebaum KC, Eitzinger J, Hayes M, Hlavinka P, Svoboda M, Dubrovsky M, Smeradova D, Wardlaw B, Pokorny E, Mozy M, Wilhite D, Zalud Z (2013) Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. *Clim Chang* 120:405–418
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol* 157:423–447
- Vanselow-Algan M (2014) Impact of summer drought on greenhouse gas fluxes and nitrogen availability in a restored bog ecosystem with differing plant communities. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* 73:103
- Vanselow-Algan M, Schmidt SR, Greven M, Fiencke C, Kutzbach L, Pfeiffer E-M (2015) High methane emissions dominate annual greenhouse gas balances 30 years after bog rewetting. *Biogeosci Discuss* 12:2809–2842. doi:10.5194/bgd-12-2809-2015
- Varallyay GY (2010) The impact of climate change on soils and their water management. *Agron Res* 8(Special Issue II):385–396
- Venterink OH, Davidsson TE, Kiehl K, Leonardson L (2002) Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil. *Plant and Soil* 243:119–130
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1994) *Welt im Wandel. Die Gefährdung der Böden*. Bd. 194. Economica, Bonn
- Wessolek G, Nehls T, Kluge B et al (2011) Bodenüberformung und Versiegelung. In: Blume HP (Hrsg) *Handbuch des Bodenschutzes*, 4. Aufl. Wiley VCH, Weinheim, S 155–169
- Whitten SM, Coggan A (2013) Market-based instruments and ecosystem services: opportunity and experience to date. In: Wratten S, Sandhu H, Cullen R, Costanza R (Hrsg) *Ecosystem services in agricultural and urban landscapes*. Wiley-Blackwell, Oxford, S 178–193
- Wiesner S, Eschenbach A, Ament F (2014) Spatial variability of urban soil water dynamics – analysis of a monitoring network in Hamburg. *Meteorologische Zeitschrift* 23(2):143–157. doi:10.1127/0941-2948/2014/0571
- Zacharias S, Bogena H, Samaniego L, Mauder M, Fuß R, Pütz T, Frenzel M, Schwank M, Baessler C, Butterbach-Bahl K, Bens O, Borg E, Brauer A, Diet-

Literatur

rich P, Hajnsek I, Helle G, Kiese R, Kunstmann H, Klotz S, Munch JC, Papen H, Priesack E, Schmid HP, Steinbrecher R, Rosenbaum U, Teutsch G, Vereecken H (2011) A network of terrestrial environmental observatories in Germany. *Vadose Zone J* 10(3):955–959

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.