

# Waldböden als CO<sub>2</sub>-Senke

Von  
Ingrid Kögel-Knabner

Wälder speichern Kohlenstoff nicht nur in Bäumen, sondern vor allem im Boden. Damit Waldböden als **natürliche CO<sub>2</sub>-Senken** funktionieren, ist Teamwork gefragt – und zwar zwischen Mikroorganismen, abgestorbenen Pflanzenresten und Mineralien.

**B**öden sind entscheidend, wenn es darum geht, Kohlenstoff (C) langfristig zu binden und damit den Anteil von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre zu verringern. Sie stellen das größte Reservoir für organischen Kohlenstoff von Landökosystemen dar. Dabei durchläuft Kohlenstoff – der Grundbaustein allen Lebens auf der Erde – einen ständigen Kreislauf: Er zirkuliert zwischen Atmosphäre, Ozeanen und den Ökosystemen an Land. In der Atmosphäre bleibt Kohlenstoff nur kurz, ehe Pflanzen ihn durch Photosynthese aufnehmen und in Biomasse verwandeln. In Landökosystemen hingegen bleibt er deutlich länger gebunden, bis Mikroben abgestorbene Biomasse zersetzen und der Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> wieder in die Atmosphäre gelangt.

Doch nicht der gesamte Kohlenstoff wird bei der Zersetzung durch Mikroben wieder freigesetzt: Ein Teil wird in organischen Verbindungen im Boden gebunden und kann dort über extrem lange Zeiträume gespeichert bleiben, insbesondere in tieferen Bodenbereichen. Welche Mechanismen den in Pflanzenresten gebundenen Kohlenstoff im Boden halten, ist Teil meiner Forschung.

Doch wie laufen diese Abbauprozesse und die mikrobielle Umwandlung organischer Substanzen ab? Durch Photosynthese nehmen Pflanzen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und wandeln es in pflanzliche Biomasse um. Ein erheblicher Teil dieser Biomasse gelangt nach dem Absterben in den Boden. In Waldböden geschieht das beispielsweise über Totholz, abgestorbene Blatt- und Wurzelbiomasse sowie über Wurzelausscheidungen. Diese organischen Substanzen sind die Basis für den mikrobiellen Stoffumsatz und die Speicherung organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden.

Die Pflanzenreste im Boden dienen insbesondere Pilzen und Bakterien als Energie- und Nährstoffquelle. Sie werden nach und nach in der organischen Auflage sowie im Mineralboden zersetzt. Während dieser Prozesse wird Kohlenstoff entweder in neue mikrobielle Biomasse eingebaut oder durch mikrobielle Atmung als CO<sub>2</sub> freigesetzt. Doch selbst der Anteil, den Bodenorganismen aufnehmen, bleibt nicht dauerhaft gebunden, da auch mikrobielle Biomasse kontinuierlich abstirbt, abgebaut und umgewandelt wird.

**Die organische Bodensubstanz zu erhalten und zu fördern, ist ein zentraler Baustein für eine naturnahe, zukunftsfähige Waldbewirtschaftung.**

Umbrisole sind Böden mit Klimaschutzeffekt: Auf saurem Gestein, etwa im Schwarzwald, entwickeln sich diese humusreichen Böden. Da Bodenorganismen hier weniger aktiv sind, lagern sie Kohlenstoff besonders nachhaltig ein.



Ein Teil des organischen Kohlenstoffs kann allerdings langfristig im Mineralboden gespeichert werden, wenn organische Verbindungen nach ihrer Zersetzung eng an Mineraloberflächen gebunden werden. Zusätzlich tragen organische Bindemittel und mikrobielle Ausscheidungen zur Bildung stabiler Bodenaggregate bei. In diesen Aggregaten wird organisches Material physikalisch eingeschlossen, was die Zersetzung weiter verlangsamt.

### **Gesunde Böden – stabile Waldökosysteme**

Durch diese Prozesse kann Kohlenstoff über Jahrzehnte bis Jahrtausende im Mineralboden gespeichert werden. Da Waldböden regelmäßig mit frischer organischer Substanz versorgt werden, liegt im Boden typischerweise ein Nebeneinander von organischem Material in unterschiedlichen Stadien der Zersetzung und Umwandlung vor – von jungem, kürzlich eingetragenen Pflanzenmaterial bis hin zu sehr alten, stark stabilisierten Verbindungen.

Organische Substanz ist deshalb das Multitalent im Boden: Sie stabilisiert das Bodengefüge und beeinflusst damit die Struktur, Porosität und Durchlüftung von humusreichen Waldböden. Dabei wirkt sie wie ein Schwamm, der Wasser nicht nur aufnimmt, sondern auch über lange Zeit speichert. Dies verbessert die Resilienz von Waldstandorten gegenüber Trockenperioden und stabilisiert die Bodenfeuchte. Dazu kommt: Die organische Bodensubstanz dient als wichtiger Nährstoffspeicher. Funktionsfähige Böden sind somit eine grundlegende Voraussetzung für stabile und widerstandsfähige Waldökosysteme. Die organische Bodensubstanz zu erhalten und zu fördern, ist ein zentraler Baustein für eine naturnahe, zukunftsfähige Waldbewirtschaftung.

### **Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffbilanz**

Die Menge an organisch gespeichertem Kohlenstoff im Boden wird durch das Verhältnis zwischen Kohlenstoffzufuhr und Zersetzung bestimmt. Die Temperatur ist dabei entscheidend: Wird es wärmer,

**Durch diese Prozesse kann Kohlenstoff über Jahrzehnte bis Jahrtausende im Mineralboden gespeichert werden.**



Parabraunerde aus Löss, ein typischer Boden Süddeutschlands, prägt dieses niederbayerische Waldgebiet.

Parabraunerde ermöglicht die Speicherung von Kohlenstoff insbesondere in tieferen Bodenbereichen.

beschleunigt sich die Zersetzung, wodurch vermehrt Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Umgekehrt verlaufen diese Prozesse bei niedrigen Temperaturen deutlich langsamer, was das Wachstum organischer Substanz begünstigen kann.

Neben klimatischen Faktoren sind auch die örtlichen Bodenbedingungen entscheidend. Die mineralische Zusammensetzung des Bodens – geprägt durch das geologische Ausgangsmaterial – bestimmt maßgeblich, wie gut organisches Material im Boden stabilisiert wird. Ebenso relevant sind die Art und Menge des organischen Materials, das in den Boden gelangt.

Hohe Kohlenstoffvorräte finden sich häufig in Böden, in denen organische Substanz nur langsam abgebaut wird – etwa, weil Sauerstoff fehlt, wie bei Stau-nässe oder feucht-kühlem Klima. Geringe Kohlenstoffvorräte finden sich dagegen häufig in flachgründigen Böden, deren Mächtigkeit durch anstehendes Festgestein, Kies oder Steine begrenzt ist. Untersuchungen zeigen: Selbst wenn im Wald mehr Laubbäume gepflanzt werden oder gekalkt wird, ändert sich die Gesamtmenge an Kohlenstoff in der organischen Auflage des Bodens und im Mineralboden kaum. Allerdings kann es zu einer Umverteilung kommen. Der Kohlenstoff wandert dann vermehrt aus der organischen Auflage in den Mineralboden ab. Das könnte zu einer stabileren langfristigen Speicherung beitragen.

### Forstwirtschaft und Naturkatastrophen

Forstwirtschaftliche Maßnahmen beeinflussen die Kohlenstoffvorräte im Boden vor allem durch zwei Faktoren: Sie können die Kohlenstoffzufuhr verändern und das Bodengefüge stören. Aufforstung auf ehemaligen Ackerflächen ist häufig damit verbunden, dass Bodenkohlenstoffvorräte zunehmen. Insbesondere Kahlschläge gehen mit erheblichen Kohlenstoffverlusten einher – die vor allem die organische Auflage sowie den oberen Mineralboden betreffen.

Wird der Wald intensiver genutzt, etwa durch Vollbaumnutzung oder die Entnahme von Stümpfen, kann das die Kohlenstoffverluste zusätzlich verstärken. Nährstoffarme Standorte reagieren dabei

**Kohlenstoffvorräte in deutschen Wäldern:**

**Gesamtsystem:**

**ca. 2.200 Mio. t C**

**Lebende Bäume:**

**1.184 Mio. t C**

**Totholz:**

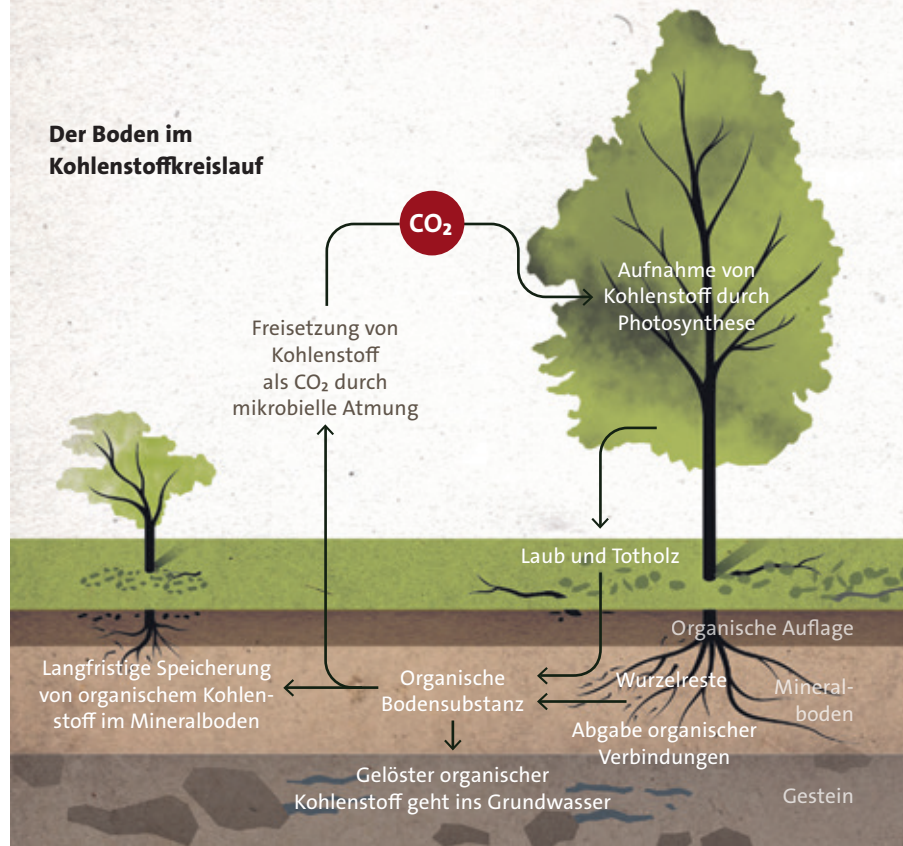
**46,1 Mio. t C**

**Oberboden (bis 30 cm):**

**936 Mio. t C**

**Unterboden (30–90 cm):**

**341 Mio. t C**



besonders sensibel. Zusätzlich beschleunigen Eingriffe in den Boden den Abbau organischer Substanz und verringern so die Kohlenstoffvorräte weiter, etwa bei der Holzernte. Auch Naturkatastrophen wie Stürme, Borkenkäferbefall oder Waldbrände bedingen erhebliche Kohlenstoffverluste: Sie zerstören nicht nur große Mengen Biomasse, sondern erfordern oft intensive Aufräumarbeiten und Neuaufforstungen.

Waldbrände spielen in Deutschland bislang eine untergeordnete Rolle, da extreme Hitze- und Trockenbedingungen seltener auftreten. Jedoch prognostizieren Experten für Mitteleuropa aufgrund des Klimawandels eine zunehmende Waldbrandgefahr, die sich langfristig auch in steigenden Waldbrandflächen widerspiegeln könnte. Waldbrände beeinflussen nicht nur den Baumbestand, sondern auch den Boden. Bei solchen Ereignissen kann die organische Substanz in der Auflage und im oberen Mineralboden thermisch verändert und teilweise in pyrogenen Kohlenstoff, also Holzkohle, umgewandelt werden. Diese Veränderung kann langfristige und schwer abschätzbare Folgen für die Bodenprozesse und die Kohlenstoffdynamik haben. Wie genau sich das auswirkt, lässt sich derzeit nur begrenzt berechnen.

**Funktionsfähige Böden sind eine grundlegende Voraussetzung für stabile und widerstandsfähige Waldökosysteme.**

Im Freisinger Wald: Ingrid Kögel-Knabner (2. v. l.) und ihr Team vom Lehrstuhl für Bodenkunde der TU München nehmen Bodenproben, um die Bestände an Kohlenstoff und Stickstoff zu analysieren.



Foto: A. Leckert/TUM

Auch verschiedene Baumarten wirken sich unterschiedlich auf den Bodenkohlenstoffhaushalt aus. Die Baumartenwahl beeinflusst etwa, ob Kohlenstoff überwiegend in der organischen Auflage oder im Mineralboden gespeichert wird. Nadelbaumarten begünstigen häufig höhere Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage, während Laubbäume den Kohlenstoff eher tiefer im Mineralboden einlagern. Wie intensiv und tief Wurzeln den Boden durchdringen, bestimmt, wie viel Kohlenstoff in tiefere Bodenbereiche gelangt, etwa über Wurzelreste und Wurzelauausscheidungen. Mit waldbaulichen Maßnahmen lassen sich diese Prozesse indirekt beeinflussen.

Durchforstung und die Bestandsdichte spielen dagegen meist nur eine untergeordnete Rolle. Drosselt man jedoch den Wildverbiss, kann das indirekt die Kohlenstoffvorräte erhöhen – was die natürliche Verjüngung und die Produktion von Biomasse fördert.

All diese Faktoren beeinflussen, wie stabil Kohlenstoff langfristig im Waldboden gebunden wird. Insbesondere das Zusammenspiel von organischer Substanz, Mikroorganismen und dem Mineralbestand bestimmt über die Funktionsfähigkeit von Böden – und liefert damit die Grundlage für eine klimafreundliche Bodenbewirtschaftung. Denn wenn es uns gelingt, die funktionelle Komplexität des Bodens zu bewahren, dann können wir sicherstellen, dass der Kohlenstoff dort langfristig gespeichert bleibt.

---

#### **Prof. em. Dr. Ingrid Kögel-Knabner**

hatte bis 2025 den Lehrstuhl für Bodenkunde an der TU München inne und war Dekanin der TUM School of Life Sciences in Weihenstephan. Mit internationalen Kolleginnen und Kollegen hat die Geoökologin neue Konzepte der Kohlenstoffstabilisierung im Boden erarbeitet. Sie ist Mitglied der BAdW und Emerita of Excellence der TUM.

---