



Abb. 1: In den Waldböden Deutschlands sind große Mengen Kohlenstoff gebunden.

# Das Kohlenstoffspeichervermögen von Waldböden

Foto: N. Wellbrock, vTI

Waldböden spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Sie sind (global betrachtet) ein größeres Reservoir für organischen Kohlenstoff als Pflanzen und Atmosphäre zusammen. Die Höhe der Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Deutschlands wird besonders durch die Standortsqualität (pH-Wert, Textur), aber auch durch atmosphärische Stoffeinträge (Stickstoffdeposition) beeinflusst. Weiterhin deuten die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung (BZE) darauf hin, dass sich mit einer angepassten Bewirtschaftung (Baumartenwahl) das Kohlenstoffspeichervermögen von Waldböden womöglich beeinflussen lässt.

*Erik Grüneberg, Winfried Riek, Ingo Schöning, Jan Evers, Peter Hartmann, Daniel Ziche*

**W**älder spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf, da sie der Atmosphäre durch Photosynthese CO<sub>2</sub> entziehen und Kohlenstoff (C) in die Biomasse einbauen. Ein Teil des in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs wird dem Boden als Streu zugeführt und in unterschiedlichster Form – angefangen von kaum zersetzter Pflanzenstreu, über Holzkohle bis hin zu sehr alten, humifizierten Komponenten – als organische Bodensubstanz festgelegt. Diese erfüllt wichtige Bodenfunktionen, indem sie u. a. ein wichtiger Sorbent für organische und anorganische Stoffe ist und beispielsweise auch das Wasserspeichervermögen und die Nährstoffver-

fügbarekeit für Pflanzen positiv beeinflusst. Allein Waldböden speichern ein Drittel des organischen Kohlenstoffs weltweit und sind somit ein größeres Kohlenstoffreservoir als

Pflanzen und Atmosphäre zusammen [1]. Dabei ist die Höhe des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs neben den bodenphysikalischen und chemischen Eigenschaften

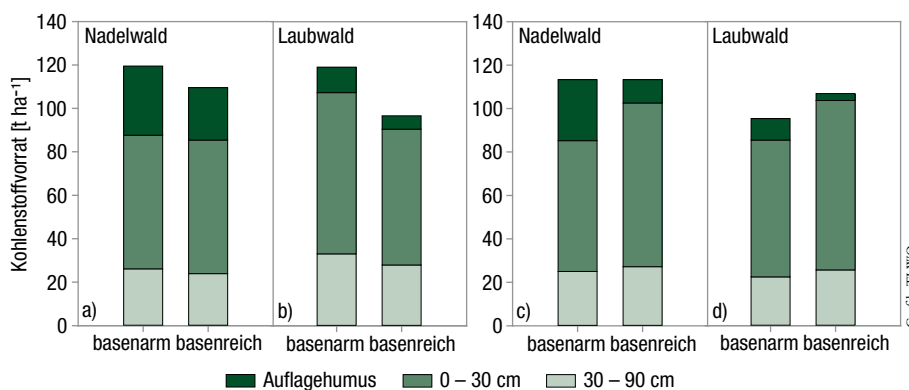


Abb. 2: Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden für unterschiedliche Bestände auf Locker- (a, b) und Festgesteinsstandorten (c, d) mit unterschiedlicher Nährstoffausstattung

sowie Klimafaktoren auch von der Bestockung und dem Wasserregime abhängig. Waldbewirtschaftungspraktiken wie Drainage, Durchforstung, Holzernte, Bodenbearbeitung oder Kalkung wirken sich ebenfalls auf die Kohlenstoffspeicherung aus [2]. Zudem beeinflussen atmosphärische Stoffeinträge wie die Stickstoffdeposition den Kohlenstoffkreislauf in Waldböden. Bereits mit der Auswertung der ersten bundesweiten BZE wurden für Waldböden Zusammenhänge zwischen Kohlenstoffvorräten und Bodenkennwerten präsentiert [3]. Mit der Wiederholung der BZE im Wald lassen sich nunmehr auch Einflüsse von Umweltparametern auf Änderungen des Bodenkohlenstoffvorrats beleuchten [4].

### Status und Veränderungen von Kohlenstoffvorräten

In den Waldböden Deutschlands sind große Mengen Kohlenstoff gebunden. Der Auflagehumus und der Mineralboden bis 90 cm Tiefe zusammen speichern durchschnittlich  $119,2 \pm 1,8 \text{ t C ha}^{-1}$ , was nach AK Standortkartierung [5] im mittleren Bewertungsbereich liegt. Wenn die Waldfläche der zweiten Bundeswaldinventur von 1,36 Mio ha zugrunde gelegt wird, so ergibt das für den Waldboden einen Kohlenstoffpool von ca. 162 Mio. t. Bezogen auf den Gesamtvorrat sind im Auflagehumus 17 % und in den oberen 30 cm des Mineralbodens 57 % des Gesamtvorrats enthalten. Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die Vorräte deutlich ab; wobei in 30 bis 60 cm noch 17 % und in 60 bis 90 cm noch 9 % des Kohlenstoffs gespeichert sind. Mit der Wiederholung der BZE nach etwa 15 Jahren lassen sich die durchschnittlichen Änderungen der Kohlenstoffvorräte seit der Erstinventur abschätzen. Im Auflage-

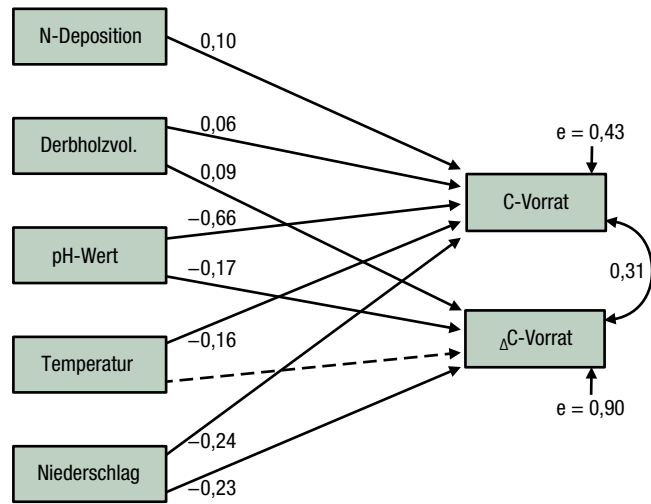


Abb. 3: Ergebnisse des Strukturgleichungsmodells für den Auflagehumus. Pfadkoeffizienten und Fehlervarianzen (e) geben Stärke und Richtung des Zusammenhangs wieder. Angegeben sind Zuweisungen von signifikanten (durchgezogener Pfeil) und nicht signifikanten (gestrichelter Pfeil) Einflüssen sowie von direkten Effekten (gerichtete Pfeile) und Kovarianzen (gebogener Doppelpfeil). Durch Weglassen eines Pfeils wird der zugehörige Koeffizient auf 0 gesetzt. (N-Deposition = Stickstoffdeposition, KA<sub>eff</sub> = effektive Kationenaustauschkapazität, C-Gehalt = organischer Kohlenstoffgehalt; C-Vorrat = organischer Kohlenstoffvorrat, ΔC-Vorrat = Änderungsrate des organischen Kohlenstoffvorrats)

Grafik: TL-WO

humus ist eine leichte jährliche Zunahme um  $0,06 \pm 0,03 \text{ t ha}^{-1}$  zu verzeichnen. Im Mineralboden ergibt sich ebenfalls eine Zunahme von jährlich  $0,69 \pm 0,05 \text{ t ha}^{-1}$  in 0 bis 30 cm Tiefe bzw. von  $0,08 \pm 0,04 \text{ t ha}^{-1}$  in 30 bis 60 cm Tiefe. Allerdings ist die jährliche Änderungsrate mit  $-0,02 \pm 0,03 \text{ t ha}^{-1}$  in 60 bis 90 cm Tiefe negativ. Für das Gesamtprofil ergibt sich somit eine Zunahme über den gesamten Zeitraum von  $11,3 \text{ t ha}^{-1}$ . Die Vorratsänderungen des Bodenkohlenstoffs zeichnen sich durch deutliche regionale Unterschiede aus. Anhand von Differenzen wuchsgebietsbezogener Mittelwerte

aus BZE I und BZE II lässt sich zeigen, dass die bundesweit stärksten Kohlenstoffzunahmen im norddeutschen Tiefland zu verzeichnen sind. Dieses trifft sowohl für die Vorräte im Auflagehumus als auch für die Mineralbodenvorräte (0 bis 30 cm) zu. Bei letzteren konzentrieren sich die stärksten jährlichen Änderungen im östlichen Bereich des

Tieflands und umfassen eine Zunahme bis  $>0,6 \text{ t ha}^{-1}$ . Außerhalb des Tieflands sind vergleichbare Zunahmen der Mineralbodenvorräte nur im nördlichen Bereich des Oberrheinischen Tieflands und der Rhein-Mainebene zu beobachten. Im Bereich der Berg- und Hügelländer sind im Auflagehumus überwiegend jährliche Abnahmeraten von bis  $>0,26 \text{ t ha}^{-1}$  zu verzeichnen. Als Ausnahme erscheint das gesamte Alpenvorland, wo die Vorräte jährlich bis zu  $>0,18 \text{ t ha}^{-1}$  zugenommen haben. Die Mineralbodenvorräte weisen in den Berg- und Hügelländern überwiegend leichte Zunahmen auf. Davon abweichend treten besonders Kalkstandorte wie die Schwäbische Alb, die Frankenalb oder der Oberpfälzer Jura mit einer jährlichen Abnahme von bis zu  $>0,3 \text{ t C ha}^{-1}$  in Erscheinung.

### Welchen Einfluss haben Bestand und Standort auf die Kohlenstoffspeicherung?

Es ist bekannt, dass die Standortbedingungen und der Bestand die Höhe des im Waldboden gespeicherten Kohlenstoffs beeinflussen. Daher wurden Nadel- und Laubholzbestände mit einem Reinbestandsanteil von 90 % für sowohl basenarme als auch basenreiche Standorte auf jeweils unterschiedlichen Gesteinsarten untersucht. Wie in Abb. 2 aufgeführt, sind die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus unter Nadelwaldbeständen höher als unter Laubwaldbeständen. Weiterhin finden sich unabhängig vom Bestand auf den basenarmen Standorten deutlich höhere Vorräte als auf den basenreicheren Standorten. In den oberen 30 cm des Mineralbodens sind tendenziell die Vorräte unter Laubwäldern höher als unter Nadelwäldern, wobei unabhängig vom Bestand Standorte aus basenreichem Festgestein höhere Vorräte aufweisen. Der Mineralboden zwischen 30 und 90 cm speichert etwa halb so viel Kohlenstoff wie der darüber liegende Mineralboden. Dabei streuen die Werte zwischen den einzelnen Gruppen beträchtlich und differenzieren kaum über die verschiedenen Standorte. Eine Tendenz höherer Vorräte auf Lockergesteinsstandorten unter Laubwald im Vergleich zu Nadelwald ist jedoch erkennbar.

#### Schneller Überblick

- Waldböden speichern ein Drittel des organischen Kohlenstoffs weltweit
- Waldbewirtschaftungspraktiken wirken sich auf die Kohlenstoffspeicherung aus
- Durch gezielte Selektion bestimmter Baumarten lassen sich die C-Vorräte im Boden möglicherweise erhöhen, z. B. durch eine stärkere Einbringung von Laubbaumarten besonders auf Lockergesteinsstandorten und/oder nährstoffreicheren Festgesteinstandorten

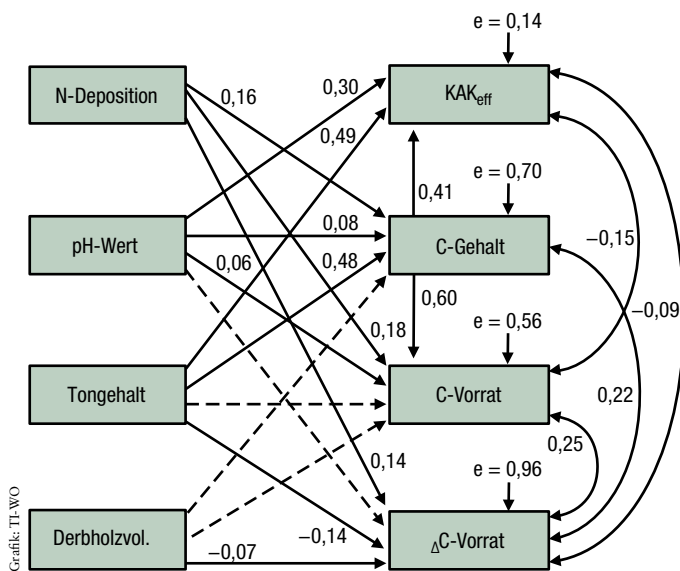


Abb. 4: Ergebnisse des Strukturgleichungsmodells für die oberen 30 cm des Mineralbodens. Beschreibung der Pfadkoeffizienten, Pfeile und Variablen siehe Abb. 3.

## Zusammenhang zwischen Umweltfaktoren und Speichervermögen von Kohlenstoff

Mittels Strukturgleichungsmodellierung (SGM) können verschiedene, die Kohlenstoffvorräte und deren jährliche Änderungsrate beeinflussende Faktoren aufgedeckt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Standortqualität (Tongehalt, pH-Wert) eine entscheidende Rolle für die Speicherung spielt. Standorte mit hohem pH-Wert (in KCl gemessen) im Auflagehumus weisen einen stärkeren Streuabbau und damit geringere Kohlenstoffvorräte auf als Standorte mit niedrigerem pH-Wert im Auflagehumus, auf denen der Streuabbau gehemmt ist (Abb. 3). Auch im Mineralboden ist der pH-Wert entscheidend (Abb. 4), da höhere pH-Werte für eine bessere Einarbeitung der oberirdischen Streu in den Mineralboden sorgen. Dieses führt zur Erhöhung des mikrobiellen Umsatzes und fördert so die Stabilisierung von Kohlenstoff. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass mit steigendem Derbholzvolumen und der damit einher-

gehenden Zunahme des Bestandsalters die Kohlenstoffvorräte des Auflagehumus ansteigen. Womöglich gab es in Beständen mit hohem Derbholzvolumen seit den letzten Bewirtschaftungsmaßnahmen keine größeren Störungen, was eine Kohlenstoffakkumulation begünstigen würde. Weiterhin legen Wachstums- und Ertragstabellen den Schluss nahe, dass die Bestandsproduktivität alter Bestände abnimmt und dass sich ein Gleichgewichtszustand nach Jahrzehnten einstellt. Untersuchungen in Nadelwäldern belegen einen Anstieg des Humusvorrats in der Auflage mit dem Bestandsalter, wobei sich auch hier ein Gleichgewichtszustand nach mehreren Jahrzehnten einstellt. Für den Mineralboden ergab sich ein schwacher negativer Effekt zwischen dem Derbholzvolumen und der Änderungsrate. Offenbar befinden sich Böden unter alten Beständen bereits im Fließgleichgewicht von Zu- und Abfuhr des Kohlenstoffs, während Böden unter jüngeren Beständen noch Potenzial aufweisen, diesen zu binden.

Ein weiterer, die Änderungsraten beeinflussender Faktor stellt die Stickstoffdeposition dar. Mit dem zusätzlich verfügbaren Stickstoff könnte die Wachstumsrate des Bestands stimuliert werden, was zu einer Akkumulation der organischen Bodensubstanz durch höhere Biomasseeinträge führen kann. Weiterhin könnte ein Überangebot an Stickstoff die Mikroorganismen veranlassen, weniger Kohlenstoff abzubauen, um an Nährstoffe heranzukommen. Dies würde ebenfalls zu höheren Vorräten im Mineralboden führen.

## Management von Bodenkohlenstoff für den Klimaschutz

Mit Blick auf den Klimaschutz wird die Speicherung von atmosphärischem Kohlenstoff in Böden als ein möglicher Beitrag zur Minderung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen diskutiert. Die Ergebnisse der BZE zeigen, dass die Speicherung von Kohlenstoff im Auflagehumus durch die Bewirtschaftung beeinflusst wird, indem Laubbaumarten geringere Vorräte aufweisen als Nadelbaumarten. Im Mineralboden hingegen ist der Einfluss der Baumarten vergleichsweise gering ausgeprägt. Dennoch dürften besonders Laubbaumarten im Vergleich zu Nadelbaumarten für eine höhere Speicherung im Unterboden und somit einer langfristigen Stabilisierung prädestiniert sein, da der Kohlenstoffeintrag in tiefe Bodenbereiche durch eine tiefere Durchwurzelung, eine höhere biologische Aktivität oder durch weniger Störungen aufgrund einer erhöhten Stabilität der Bestände begünstigt wird. Da der Kohlenstoffpool ebenfalls durch die Standortverhältnisse geprägt ist, ließen sich durch gezielte Selektion bestimmter Baumarten die Vorräte im Boden möglicherweise erhöhen. Ermöglicht werden könnte dies durch eine stärkere Einbringung von Laubbaumarten besonders auf Lockergesteinsstandorten und/oder nährstoffreicheren Festgesteinsstandorten. Weiterhin hat sich gezeigt, dass Fremdstoffeinträge wie die Stickstoffdeposition den Bodenkohlenstoff im Wald beeinflussen. Allerdings sind die Daten der BZE hinsichtlich der Auswertungsmöglichkeiten für prozessrelevante Fragestellungen wie der Rückkopplung von erhöhtem Stickstoffeintrag auf den Umsatz organischer Substanz limitiert. Hierfür könnten die Daten z. B. aus dem intensiven (Level II)-Monitoring und der BZE integrierend ausgewertet werden. Indessen sollte die Reduktion von Stickstoffeinträgen eine besondere Priorität bei weiteren politischen Anstrengungen zur Luftreinhaltung haben.

## Literaturhinweise:

[1] SCHLESINGER, W. (1997): Biogeochemistry: An analysis of global change. Academic Press, San Diego. [2] JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R. et al. (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma 137 (3-4), S. 253-268. [3] WOLFF, B.; RIEK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996 – Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn. [4] GRÜNEBERG, E.; RIEK, W.; SCHÖNING, I.; EVERS, J.; HARTMANN, P. et al. (2016): Kohlenstoffvorräte und deren zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland (Hrsg. WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H.) Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Thünen Report 43. [5] AK STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. IHW-Verlag, Eiching bei München.

Dr. Erik Grüneberg, erik.grueneberg@thuenen.de, und Dr. Daniel Ziche arbeiten in der BZE-Arbeitsgruppe des Thünen-Instituts für Waldökosysteme in Eberswalde. Prof. Dr. Winfried Riek ist wissenschaftlicher Leiter für Forstliche Umweltkontrolle/Bodenzustand/Wasserhaushalt am LFE Eberswalde.

Dr. Ingo Schöning arbeitet als Wissenschaftler in der Abteilung Biogeochemische Prozesse am MPI für Biogeochemie in Jena. Dr. Peter Hartmann ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Boden und Umwelt der FVA Baden-Württemberg in Freiburg tätig. Dr. Jan Evers bearbeitet die BZE an der NW-FVA in Göttingen.

