

Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO₂-Quelle

Frank Hagedorn

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*

Ana Moeri

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Lorenz Walthert

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Stephan Zimmermann

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Soil organic carbon in Swiss forest soils – a potential CO₂ source in a warming climate

Soils contain the largest carbon stocks of terrestrial ecosystems. The expected climatic warming may turn soils into a CO₂ source by increasing the mineralization of soil organic matter. However, changes in soil carbon (C) are hardly detectable because the expected changes within some years are much smaller than the large amounts of C stored in soils. Our approach was to quantify changes in soil C storage along natural climatic gradients by comparing C stocks of more than 250 soil profiles at different altitudes across Swiss forest ecosystems. In addition, we studied the response of soil CO₂ effluxes to an experimental soil warming by 4 °C at the alpine treeline. The carbon dynamics along the natural and experimental temperature gradients strongly suggest losses of soil carbon under climatic warming. Soil warming at the treeline induced 25% to 40% higher soil CO₂ effluxes during three treatment years. In Swiss forest ecosystems, soil carbon stocks decrease with decreasing altitude and thus, they decline with increasing mean temperatures, but also with a changing dominance from coniferous to deciduous trees. This decrease in soil carbon is particularly strong in the organic layer. Translating the decline in soil carbon with decreasing altitude to the expected climatic warming by 1.8 to 4 °C during the next century suggests carbon losses of 15 to 34 million t C from Swiss forest soils, which would cancel out the C sink in Swiss forests of several decades. The CO₂ lost from soils would foster the climatic warming.

Keywords: altitudinal gradient, climate change, soil organic carbon, soil warming

doi: 10.3188/szf.2010.0530

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail hagedorn@wsl.ch

Böden sind die grössten Kohlenstoffspeicher terrestrischer Ökosysteme; sie enthalten etwa dreimal so viel organischen Kohlenstoff (C) wie die Biomasse und dreimal mehr C als die Atmosphäre in Form von CO₂ (Solomon et al 2007). Durch die Bildung von Humus binden Böden CO₂, über den Abbau von Humus geben sie jedoch auch CO₂ an die Atmosphäre ab. Dieser CO₂-Austausch zwischen Böden und Atmosphäre ist rund zehnmal grösser als die CO₂-Freisetzung aus fossilen Brennstoffen. Vorratsmessungen von Kohlenstoff entlang von Chronosequenzen weisen auf ein Gleichgewicht zwischen CO₂-Bindung und -Freisetzung in entwickelten Böden hin (Schlesinger 1990). Wahrscheinlich ist dieses Gleichgewicht dynamischer Natur, geringfügige Verschiebungen können Böden daher zu bedeutenden CO₂-Quellen und -Senken werden lassen.

Das sich erwärmende Klima beeinflusst die Umsetzungsprozesse von Kohlenstoff in Ökosystemen. Damit könnte es auch zu einer Veränderung

der Kohlenstoffspeicherung im Boden kommen. In kalten und gemässigten Klimaten wird eine höhere Temperatur – wenn es nicht gleichzeitig trockener wird – das Pflanzenwachstum und damit auch den Streueintrag in Böden erhöhen. Auf der anderen Seite regt eine Erwärmung auch den Humusabbau und damit die CO₂-Freisetzung aus Böden an (Hagedorn et al 2010). Welcher dieser beiden gegenläufigen Prozesse stärker von einer Erwärmung profitiert und in welche Richtung sich die Netto-CO₂-Bilanz verschiebt, ist wissenschaftlich umstritten (z.B. Cox et al 2000, Frank et al 2010). Eine verstärkte CO₂-Freisetzung aus Böden durch sich abbauenden Humus würde jedoch die laufende Klimaerwärmung verstärken.

Veränderungen der Kohlenstoffspeicherung sind im Boden nur schwer nachweisbar, da sie im Verhältnis zu den gesamten Kohlenstoffvorräten sehr klein sind und häufig nur langsam stattfinden. Unsere Studie basiert auf zwei Ansätzen. Zum einen untersuchten wir, wie sich die Kohlenstoffvorräte

von über 250 Böden entlang natürlicher Klimagradienten, d.h. mit zu- beziehungsweise abnehmender Höhenlage, ändern. Zum anderen erwärmt wir experimentell Böden an der Waldgrenze um 4 °C und bestimmten, wie sich dadurch der CO₂-Fluss aus dem Boden erhöht. Ziel war es, abzuschätzen, ob und in welchem Ausmass Schweizer Waldböden bei der zu erwartenden Klimaerwärmung Kohlenstoff aus dem Humus verlieren und deshalb zu CO₂-Quellen werden.

Methoden

Messung der Kohlenstoffvorräte

Die Kohlenstoffvorräte der organischen Auflagen wurden anhand von Feldaufnahmen von Oberböden an 878 Standorten erfasst, bei denen die Mächtigkeiten der Auflagehorizonte aufgenommen wurden. Um aus diesen Feldaufnahmen die Kohlenstoffvorräte zu ermitteln, bestimmten wir die Dichte von Horizonten der organischen Auflage an 30 Standorten. Mit diesen und den Kohlenstoffgehalten organischer Auflagehorizonte von 400 Bodenprofilen liessen sich dann die Kohlenstoffvorräte aller 878 Standorte errechnen (siehe Moeri 2007).

Die Kohlenstoffvorräte der Mineralböden wurden anhand der Daten der Waldzustandsinventur des Jahres 1993 (WZI, Lüscher et al 1994) ermittelt. Bei dieser wurden im regelmässigen 8×8-km-Netz 172 Böden beprobt. Zusätzlich flossen die Daten von 86 Böden ein, welche im Buch «Waldböden der Schweiz» (Walther et al 2004) dokumentiert sind. Die zur Kohlenstoffvorratsberechnung notwendigen Feinerdedichten und Skelettgehalte wurden am Bodenprofil geschätzt und mit gemessenen Werten validiert. Die Bestimmung der Gehalte erfolgte von allen Proben mit einem C/N-Analyser nach Zerstörung von möglichem Carbonat mittels HCl-Fumigation (Walther et al 2010).

Die Vorräte in den organischen Auflagen und in allen Bodenprofilen mitsamt der Mineralböden wurden horizontweise berechnet und pro Standort über alle Horizonte mit nachweisbarer C_{org}-Konzentration gemäss Gleichung (1) zum Gesamtvorrat (in t C/ha) aufsummiert. Die morphologischen Horizonte werden als homogen bezüglich Eigenschaften und Konzentration angenommen.

$$SOC_{dz} = \sum_i \rho_{FE} \times \left(1 - \frac{\delta_{i,2mm}}{100}\right) \times d_i \times C_i \quad (1)$$

wobei

ρ_{FE} = Feinerdedichte Horizont *i* in kg/dm³

$\delta_{i,2mm}$ = Skelettanteil >2 mm in %

d_i = Mächtigkeit Horizont *i* in dm

C_i = organische Kohlenstoffkonzentration in g/kg

\sum_i^d = summiert zwischen der Bodenoberfläche und der Tiefe d_z

Die Kohlenstoffspeicherung in der Waldbiomasse der verschiedenen Schweizer Regionen wurde aus den publizierten Biomassen des dritten Schweizerischen Landesforstinventars und einer angenommenen Konzentration von 0.5 errechnet (Cioldi et al 2010).

Experimentelle Erwärmung

An der alpinen Waldgrenze erwärmen wir mit auf der Bodenoberfläche ausgelegten Heizkabeln seit 2007 20 Flächen (1.1 m²) um etwa 4 °C während der schneefreien Periode. In erster Linie betrifft diese Erwärmung die 15 cm mächtige organische Auflage, in der sich über 95% der Wurzeln befinden. Die Luft wird bis in etwa 20 cm Höhe erwärmt. Die CO₂-Freisetzung aus dem Boden wird mit einer Bodenatmungskammer und einem Infrarot-Gasanalyser (LI-820) gemessen. Genauere Informationen zu dem fortlaufenden Versuch befinden sich in Hagedorn et al (2010).

Ergebnisse und Diskussion

Kohlenstoffvorräte in Schweizer Waldböden

Die Waldböden sind der grösste Kohlenstoffspeicher im Schweizer Wald. Im Humus speichern sie durchschnittlich 144 t C pro Hektar, was 20% mehr als der Vorrat in der Biomasse und etwas mehr als doppelt so viel wie die Menge an atmosphärischem CO₂ über der Schweiz ist (Bafu & WSL 2005). Der grösste Teil der organischen Bodensubstanz wird im Mineralboden gespeichert. Die organische Auflage enthält nur zwischen 6 und 25% des Bodenkohlenstoffs (Abbildungen 1 und 2). Dieser Kohlenstoff ist jedoch leicht abbaubar und wird am schnellsten auf Umweltveränderungen reagieren. Den höchsten Vorrat an Kohlenstoff weisen die Böden der Alpensüdseite auf (Abbildung 1). Wahrscheinlich ist dies auf die hohen Gehalte an Eisen- und Aluminiumoxiden zurückzuführen, die den Humus vor dem Abbau durch Mikroorganismen schützen. Zudem enthalten die Böden der Alpensüdseite grosse Mengen an «Black Carbon» – Rückstände der häufigen Waldbrände, die nur schlecht abbaubar sind (Eckmeier et al 2010).

Modellierungsarbeiten legen nahe, dass mit zunehmender Biomassenproduktion und damit erhöhtem Streueintrag auch die Speicherung in Böden zunimmt (Perruchoud et al 1999). Im Verlaufe des letzten Jahrhunderts hat in der Schweiz der Eintrag in die Waldböden zugenommen, da der Wald weniger stark genutzt wurde und auch das Wachstum als Folge der Klimaerwärmung, der Stickstoffeinträge und der CO₂-Düngung zunahm. Daher vermuten Perruchoud et al (1999) in einer Modellierung des Schweizer Bodenkohlenstoffs, dass auch die Kohlenstoffspeicherung in den Schweizer Waldböden wäh-



Abb 1 Typischer Rohhumus eines montanen Nadelwaldes (links) und typischer Mull des Schweizer Mittellandes (rechts). Wegen der geringen biologischen Aktivität bildet sich beim Rohhumus eine mächtige organische Auflage mit den Humushorizonten L, F und H. Beim Mull werden hingegen die Vegetationsrückstände durch eine rege biologische Aktivität innerhalb eines Jahres weitestgehend abgebaut beziehungsweise mit dem Mineralboden durchmischt.

Fotos: M. Walsler

rend der letzten 100 Jahre zugenommen hat. Der Vergleich der Kohlenstoffvorräte in den Böden und der auf diesen Böden wachsenden Waldbiomasse legt allerdings das Gegenteil nahe (Abbildung 2): Die höchsten Kohlenstoffvorräte im Boden haben nicht die produktivsten Regionen mit hohen Biomassen wie das Mittelland, sondern diejenigen mit den geringsten Biomassen, die Alpen und die Alpensüdseite. Diese beiden Regionen weisen auch die geringsten Zuwächse auf (Cioldi et al 2010). Dies legt zum einen den Schluss nahe, dass diejenigen Faktoren, die das Waldwachstum begünstigen, sich auch auf den Abbau im Boden auswirken. Zum anderen können gewisse Bodeneigenschaften wie z.B. humusstabilisierende Eisen- und Aluminiumoxide eine wich-

tigere Bedeutung für die Kohlenstoffspeicherung haben als die Menge an eingetragener Streu, die mit der Biomasse und den Zuwächsen korreliert ist (Hagedorn et al 2003, Eckmeier et al 2010).

Abnehmender Bodenkohlenstoff mit abnehmender Höhenlage

Die Folgerung, dass die Vorräte an Bodenkohlenstoff bei günstigen Wuchsbedingungen eher niedriger sind, wird durch die mit abnehmender Höhenlage abnehmenden Kohlenstoffvorräte im Boden unterstützt (Abbildung 3). Auf den ersten Blick erscheint der Höhengradient der Kohlenstoffvorräte gering (Abbildung 3); Streueintrag und Humusabbau gleichen sich in etwa aus. Allerdings steigen insbesondere die Vorräte der organischen Auflage mit zunehmender Höhe signifikant an, über 1000 Höhenmeter verdoppeln sie sich etwa. Im Mineralboden ist dieser Trend relativ betrachtet weniger ausgeprägt (20% über 1000 Höhenmeter). Die absolute Zunahme liegt jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung wie diejenige der organischen Auflage. Im gesamten Boden erhöht sich der Kohlenstoffvorrat um 4.5 t C/ha pro 100 Höhenmeter, was etwa einer Zunahme von 30% über 1000 Höhenmeter entspricht.

Diese Veränderungen entlang des Höhengradienten erlauben einen Blick in die Zukunft, da sich die Durchschnittstemperatur über 100 Höhenmeter um durchschnittlich 0.65 °C ändert. Der zu erwartende Temperaturanstieg im nächsten Jahrhundert liegt bei 1.8 bis 4 °C (Solomon et al 2007), was einer Abnahme der Höhenlage um 275 beziehungsweise 600 m entspricht. Überträgt man die erwartete Erwärmung auf den gemessenen Höhengradienten, so würde sie zu einer Abnahme des Bodenkohlen-

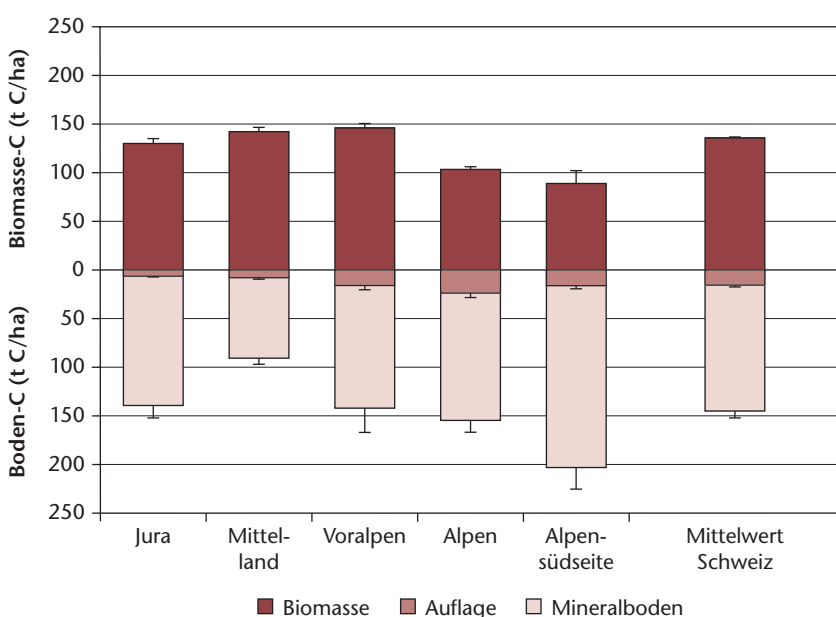


Abb 2 Kohlenstoffvorräte in der Biomasse und in den Böden der fünf Produktionsregionen sowie der Mittelwert des Schweizer Waldes.

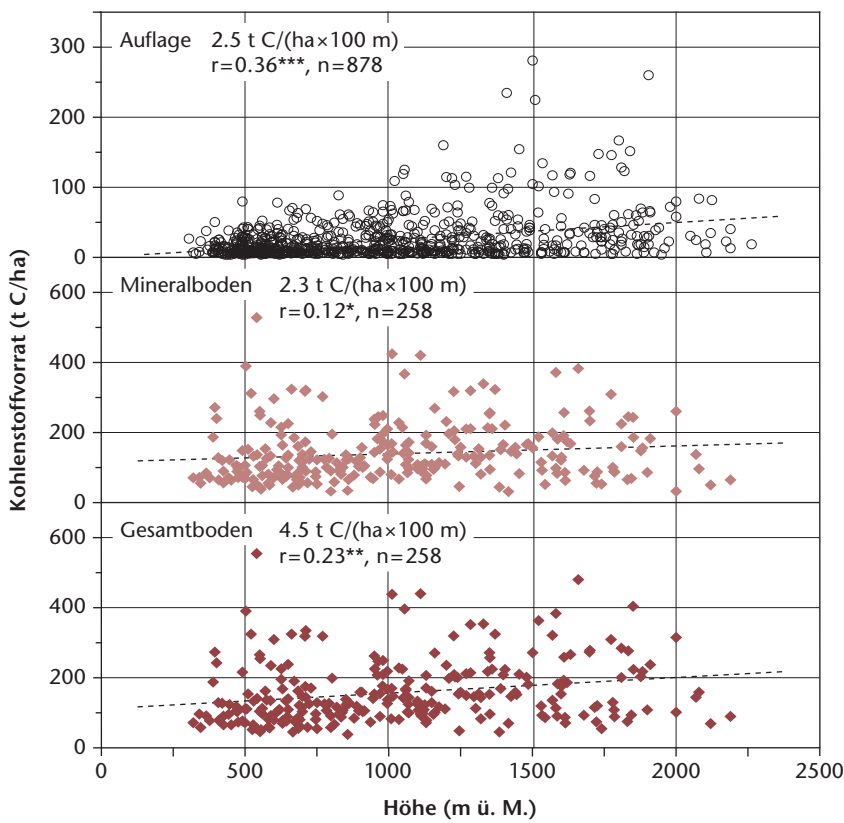


Abb 3 Beziehung zwischen Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage, im Mineralboden und im gesamten Boden und der Höhenlage. Die gestrichelten Trendlinien sind lineare Regressionen.

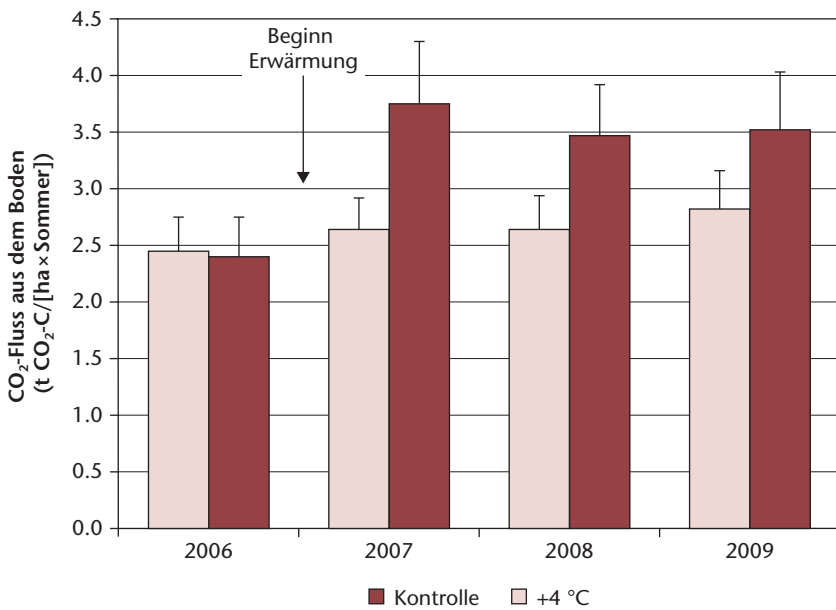


Abb 4 Auswirkungen einer experimentellen Bodenerwärmung an der alpinen Waldgrenze auf den CO₂-Fluss aus dem Boden. Mittelwerte und Standardfehler von 20 Versuchsflächen.

	C-Abnahme 100 Höhenmeter t C/0.65 °C	C-Verlust Szenario: +1.8 °C t C/ha	C-Verlust Szenario: +4 °C t C/ha	Gesamter C-Verlust Schweizer Waldböden Mio. t C
Auflage	2.5 ± 0.2	6.6 ± 0.6	14.8 ± 1.2	8.2 – 18.2
Gesamtboden	4.5 ± 1.2	12.5 ± 3.3	27.7 ± 7.4	15.4 – 34.2

Tab 1 Abschätzung der aufgrund des Höhengradienten zu erwartenden Kohlenstoffverluste für unterschiedliche Klimaszenarien (B2 und A1FI; Solomon et al 2007).

stoffs um 12.5 bis 28 t C/ha führen (Tabelle 1). Wie bedeutend wäre dieser Kohlenstoffverlust? Extrapoliert man ihn auf die Fläche des Schweizer Waldes, so betrügen die zu erwartenden CO₂-Verluste aus den Böden im nächsten Jahrhundert etwa 15 bis 34 Mio. t CO₂-C. Dies entspräche den Schweizer Treibhausgasemissionen von einem beziehungsweise drei Jahren, und der Verlust an Bodenkohlenstoff würde die anhand des zweiten und des dritten Landesforstinventars ermittelte Kohlenstoffsenke im Schweizer Wald (0.7 Millionen t C pro Jahr; Bafu 2007, Bafu & WSL 2005) für einige Jahrzehnte aufheben.

Entlang eines Höhengradienten ändern sich jedoch nicht nur die Temperaturen, sondern auch andere Umweltfaktoren. So steigen zum Beispiel die Niederschläge mit zunehmender Höhe an. Sie korrelieren jedoch deutlich weniger eng mit den Vorräten als die Wärme und Gradtage während der Vegetationsperiode (errechnet nach Zimmermann & Kienast 1999). Hinsichtlich des Muttergesteins zeigt sich, dass sowohl auf silikatischem als auch auf kalkhaltigem Ausgangssubstrat die Vorräte im Boden mit abnehmender Höhe signifikant abnehmen. Auch die Baumarten beeinflussen die organische Bodensubstanz. Böden unter Laubbäumen weisen in der Regel niedrigere Vorräte auf als diejenigen unter Nadelbäumen (Moeri 2007). Da der Anteil an Laubwald mit zunehmender Höhe zurückgeht, trägt ein Baumartenwechsel sicherlich auch zu den abnehmenden Vorräten mit abnehmender Höhe bei. Die zu erwartende Klimaerwärmung wird aber auch zu einer Artenverschiebung führen – Laubwälder werden ihr Areal nach oben ausbreiten (z.B. Zimmermann et al 2006). Ein Höhengradient spiegelt daher die Vielzahl der sich bei einem Klimawandel verändernden Faktoren wider. Die mit abnehmender Höhe abnehmenden Kohlenstoffvorräte legen daher nahe, dass die zu erwartende Erwärmung zu CO₂-Verlusten aus den Schweizer Waldböden führen wird, sofern sich der Wasserhaushalt der Böden nicht grundsätzlich ändert.

Bodenerwärmung führt zu Kohlenstoffverlusten

Wie realistisch ist der aufgrund des Höhengradienten zu erwartende Verlust, und mit welchem CO₂-Freisetzungsraten ist zu rechnen? Die experimentelle Bodenerwärmung um 4 °C an der alpinen Waldgrenze steigerte die CO₂-Freisetzung aus dem Boden deutlich (Abbildung 4). Im ersten Versuchsjahr gaben die erwärmten Böden 42% mehr CO₂ ab als die nicht erwärmten Kontrollböden. Im zweiten und dritten Jahr waren es noch 32% beziehungsweise 25%. Isotopenmessungen belegten, dass diese gesteigerte CO₂-Freisetzung nicht aus einer angeregten Wurzelatmung stammte, sondern aus dem Abbau von Humus durch eine angeregte mikrobielle Aktivität

(Hagedorn et al 2010). Dass die Verluste der organischen Substanz mit der Zeit abnehmen, ist auf eine Verarmung des Bodens an leicht abbaubaren Stoffen oder aber auf eine Anpassung der Mikroorganismen im Boden zurückzuführen. Rechnet man die hier gemessenen Verluste an Bodenkohlenstoff auf die Fläche um, so ergibt dies durch die Erwärmung eine gesteigerte CO₂-Freisetzung von 0.8 bis 1.2 t C/ha und Jahr (Abbildung 3). Diese Verluste überstiegen die nur leicht erhöhte Bindung von Kohlenstoff in wachsender Biomasse (etwa 0.2–0.4 t C/[ha × Jahr]). Damit ist das Ökosystem an der Waldgrenze zu einer CO₂-Quelle geworden (Hagedorn et al 2010). Noch höhere Kohlenstoffverluste aus dem Boden fanden Schindlbacher et al (2009) bei einer vergleichbaren Erwärmung in einem montanen Nadelwald in Österreich (1.8 t C/[ha × Jahr]). Diese Raten zeigen klar, dass es in einem wärmeren Klima anfänglich zu hohen Kohlenstoffverlusten kommt. Der Vergleich dieser experimentell gemessenen Raten mit dem natürlichen Temperaturgradienten in Funktion der Höhenlage (Tabelle 1) ergibt Kohlenstoffverluste bei sich erhöhenden Temperaturen in einer vergleichbaren Größenordnung: Die aufgrund des Höhengradienten zu erwartende Abnahme des Bodenkohlenstoffs um 12.5 bis 28 t C/ha bei einer Klimaerwärmung um 1.8 bis 4 °C könnte innerhalb einiger Jahrzehnte erfolgen.

Schlussfolgerung

Die Kohlenstoffdynamik entlang natürlicher und experimenteller Temperaturgradienten legt nahe, dass die Klimaerwärmung zu CO₂-Verlusten aus dem Boden führen wird. Durch die experimentelle Bodenerwärmung wurde die CO₂-Freisetzung aus Böden stark erhöht. In den Schweizer Waldböden nehmen die Kohlenstoffvorräte mit abnehmender Höhenlage ab, insbesondere diejenigen der organischen Auflage. Überträgt man die gemessenen Kohlenstoffverluste auf die voraussichtliche Klimaerwärmung von 1.8 bis 4 °C im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts, so lässt dies einen Verlust von 15 bis 34 Millionen t C aus Schweizer Waldböden erwarten. Dieser Verlust liegt in einer für die Treibhausgasbilanz relevanten Größenordnung. Aus dem Humus des Bodens freigesetztes CO₂ würde die Klimaerwärmung weiter verstärken. ■

Eingereicht: 25. März 2010, akzeptiert (mit Review): 22. September 2010

Dank

Wir danken Roger Köchli und Marco Walser für die Beprobung der meisten Bodenprofile und Stephan Hättenschwiler, Christian Rixen, Melissa Martin, Sonja Wipf und allen weiteren Projektpartnern

für die Zusammenarbeit bei dem Bodenerwärmungsversuch. Die Forschungsplattform «Klimawandel an der Waldgrenze» wurde von der Veluxstiftung, dem Schweizerischen Nationalfonds, dem SBF-COST und dem CCES (Mountland) finanziell unterstützt.

Literatur

- BAFU (2007)** Jährlicher Netto-Senkeneffekt im Wald, 1990–2005. Bern: Bundesamt Umwelt. www.bafu.admin.ch/wald/01198/01209/01212/index.html?lang=de (21.10.2010)
- BUWAL, WSL (2005)** Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 152 p.
- CIOLDI F ET AL (2010)** Waldressourcen. In: Brändli U, editor. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft. pp. 31–113.
- COX PM, BETTS RA, JONES CD, SPALL SA, TOTTERDELL IJ (2000)** Acceleration of carbon cycle feedbacks. *Nature* 408: 184–187.
- ECKMEIER E ET AL (2010)** Preservation of fire-derived carbon compounds and sorptive stabilisation promote the accumulation of organic matter in black soils of the Southern Alps. *Geoderma* 159: 147–155.
- FRANK DC ET AL (2010)** Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. *Nature* 463: 528–530.
- HAGEDORN F, SPINNLER D, BUNDT M, BLASER P, SIEGWOLF R (2003)** The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂. *Glob Change Biol* 9: 862–872.
- HAGEDORN F ET AL (2010)** Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental warming at the Swiss alpine treeline. *Biogeochemistry* 97: 7–19.
- LÜSCHER P, RIGLING A, WALTHERT L, ZIMMERMANN S (1994)** Waldzustandsinventur 1993 – Bodenkundliche Erhebungen. *Bull Bodenkd Ges Schweiz* 18: 69–75.
- MOERI AC (2007)** Kohlenstoffvorräte in Schweizer Waldböden unter besonderer Berücksichtigung der organischen Auflage. Zürich: Univ Zürich, Diplomarbeit. 83 p.
- PERRUCHOUD D, KIENAST F, KAUFMANN E, BRÄKER OU (1999)** 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. *Ecosystems* 2: 320–337.
- SCHINDLBACHER A, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, JANDL R (2009)** Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? *Glob Change Biol* 15: 901–913.
- SCHLESINGER WH (1990)** Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348: 232–234.
- SOLOMON S ET AL, EDITORS (2007)** Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press. 996 p.
- WALTHERT L, ZIMMERMANN S, BLASER P, LUSTER J, LÜSCHER P (2004)** Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft. 768 p.
- WALTHERT L ET AL (2010)** Determination of organic and inorganic carbon, δ¹³C and nitrogen in soils containing carbonates after acid fumigation with HCl. *J Plant Nutr Soil Sci* 173: 207–216.

ZIMMERMANN NE, KIENAST F (1999) Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *J Veget Sci*: 469–482.

ZIMMERMANN NE ET AL (2006) Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In: Wohlgemuth T, editor. *Wald und Klimawandel*. Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft, Forum für Wissen 2006. pp. 63–71.

Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO₂-Quelle

Böden enthalten die grössten CO₂-Mengen von terrestrischen Ökosystemen. Bei der zu erwartenden Klimaerwärmung könnten Böden durch einen gesteigerten Humusabbau zu CO₂-Quellen werden. Mittels Bodenuntersuchungen ist dies aber aufgrund der grossen Mengen an gespeichertem Kohlenstoff nur schwer nachweisbar. In dieser Studie vergleichen wir die Kohlenstoffvorräte von über 250 Schweizer Waldböden entlang natürlicher Klimagradienten mit sich ändernder Höhenlage. Zusätzlich zeigen wir Ergebnisse eines Freilandversuches an der Waldgrenze, in dem wir Böden um 4 °C erwärmten und die Auswirkungen auf den CO₂-Fluss aus dem Boden untersuchten.

Die Kohlenstoffdynamik entlang der natürlichen und der experimentellen Temperaturgradienten lässt vermuten, dass es in einem zukünftigen, wärmeren Klima zu Kohlenstoffverlusten aus dem Boden kommt. Durch die Erwärmung an der Waldgrenze ergab sich eine um 25 bis 40% erhöhte CO₂-Freisetzung aus den Böden während der ersten drei Versuchsjahre. In den Schweizer Waldböden nimmt die Kohlenstoffspeicherung mit abnehmender Höhe und daher auch mit einem wärmeren Klima ab. Dies gilt insbesondere für die organische Auflage. Überträgt man diese Kohlenstoffabnahme auf die voraussichtliche Klimaerwärmung von 1.8 bis 4 °C im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts, so lässt dies einen Kohlenstoffverlust von 15 bis 34 Millionen Tonnen Kohlenstoff aus den Schweizer Waldböden erwarten, der die Kohlenstoffsenke einiger Jahrzehnte aufheben würde. Dieses aus dem Humus des Bodens freigesetzte CO₂ würde die Klimaerwärmung weiter verstärken.

Le carbone dans les sols forestiers suisses – source potentielle de CO₂ en cas de réchauffement climatique

La plus grande quantité de CO₂ contenu dans l'écosystème terrestre est stockée dans la matière organique du sol. Or, avec le réchauffement climatique attendu, le sol pourrait devenir une source de CO₂ du fait d'une décomposition accrue de la matière organique. Il est toutefois difficile de le confirmer par des analyses pédologiques à cause de la grande quantité de carbone fixée dans le sol. Cette étude compare les stocks de carbone dans plus de 250 sols forestiers suisses sélectionnés le long de gradients climatiques naturels et situés à des altitudes différentes. Elle présente de plus les résultats d'un essai sur le terrain à la limite supérieure de la forêt: la température du sol y a été artificiellement augmentée de 4 °C afin d'étudier les impacts sur le flux de CO₂ libéré.

La dynamique du carbone le long des gradients de températures naturels et expérimentaux semble indiquer une perte de carbone du sol en cas de réchauffement ultérieur du climat. L'essai sur le réchauffement à la limite de la forêt a mis en évidence, pendant les trois premières années de l'observation, une augmentation de 25% à 40% de CO₂ libéré par les sols. Dans les sols forestiers suisses, le stockage de carbone diminue avec une altitude inférieure et un climat plus chaud, ce qui est d'autant plus vrai pour la couche organique. Appliquée à un réchauffement climatique prévu de l'ordre de 1.8 °C à 4 °C pour le siècle prochain, cette diminution de carbone pour les sols forestiers serait, estime-t-on, comprise entre 15 et 34 millions de tonnes. Ce phénomène annulerait le puits de carbone de quelques décennies, et le CO₂ supplémentaire libéré par la matière organique accentuerait encore le réchauffement climatique.