

Der kräftige Atem der Waldböden

CO₂-Respirationsmessungen an Waldklimastationen zeigen: Waldböden setzen große Kohlenstoffmengen um

Christoph Schulz und Daniel Klein

Wald hat unzweifelhaft einen Klimaschutzeffekt, indem er Kohlenstoff bindet und damit der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlendioxid entzieht. Da jedem Forstmann Daten oder überschlägige Schätzungen des Holzzuwachses zur Verfügung stehen, wird die Speicherleistung des Waldes oft über seine lebende Biomasse dargestellt. Die anderen Kohlenstoffspeicher im Wald, also die abgestorbene Biomasse und der Boden werden dabei gerne vernachlässigt beziehungsweise als gleichbleibend angenommen. Respirationsmessungen an fünf bayerischen Waldklimastationen sollten einen Beitrag leisten, die Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Boden zu quantifizieren, um Rückschlüsse auf die Veränderungen des Bodenspeichers zu ermöglichen.

Durch die Photosynthese der Bäume wird Kohlendioxid (CO₂) der Atmosphäre entzogen und in Kohlenhydrate umgewandelt. Diese energiereichen organischen Verbindungen werden im Baum verteilt und zu einem Teil gleich wieder für physiologische Prozesse der Pflanzen – auch in den Wurzeln – veratmet und der Kohlenstoff dadurch als CO₂ wieder freigesetzt. Dieser Verbrauch durch die Bäume selbst wird als autotrophe Respiration bezeichnet.

Der nicht von den Bäumen verbrauchte Kohlenstoff wird in Form zuwachsender Biomasse gespeichert. Über absterbende Biomasse (besonders Streufall) wird dem Boden totes organisches Material zugeführt und in verschiedenen Stadien der Umwandlung zu Huminstoffen und in unterschiedlichen Bindungsformen gespeichert. Ein Teil des organischen Kohlenstoffs im Boden wird ständig durch Mikroorganismen abgebaut, was zur Freisetzung von CO₂ führt. Dieser Prozess wird als heterotrophe Respiration bezeichnet. Er ist für die Kohlenstoffbilanz bedeutend, da die Differenz aus diesem Abbau des Bodenkohlenstoffs und der Zufuhr toten organischen Materials aus Streu und Totholz über die Änderung des Kohlenstoffvorrats im Boden entscheidet.

Um die Änderungen im Boden abzuschätzen, kann die Veränderung des Kohlenstoffvorrats zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten ermittelt werden (*Stock-Change Methode*). Da die Kohlenstoffvorräte im Boden sehr groß sind, kleinräumig stark schwanken und die Veränderungen meist sehr gering sind, können oft keine signifikanten Änderungen zwischen zwei Erhebungen festgestellt werden. Eine Alternative zur Stock-Change Methode ist die direkte Messung der Kohlenstoffmengen, die den Boden gasförmig verlassen, sogenannte *Respirationsmessungen*, die den Kohlenstoffeinträgen durch Streu und Totholz gegenübergestellt werden können. Die Ergebnisse können dann in Modellen zur Kohlenstoffbilanzierung angewendet werden. An fünf Waldklimastationen (Altdorf, Flossenbürg, Freising, Ebersberg und Riedenburg) hat die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft – unterstützt von der EU (s. Kasten) zwischen 2006 und 2009 solche Messungen ausgeführt.

Respirationsmessungen an den WKS

An fünf Waldklimastationen (WKS) wurden im Sommer 2006 je neun Messkammern von circa 0,2 Quadratmetern (m²) Standfläche aufgestellt, in denen wöchentlich für vier Minuten der CO₂-Fluss aus dem Boden gemessen wurde. Dafür wurde die Kammer mit einem Deckel geschlossen und über einen mobilen Infrarot-Gasanalysator der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Kammer erfasst. Über Volumen und Standfläche der Kammern, Lufttemperatur, Luftdruck, Molmasse und Molvolumen kann von der Konzentration auf den Fluss umgerechnet werden. Der Fluss wird für den Kohlenstoff des gemessenen CO₂ in Milligramm je Quadratmeter und Stunde (mg CO₂-C/(m² * h)) ausgegeben. Nach einem circa sechsmonatigen Vorlauf wurden drei verschiedene Eingriffe (Varianten) vorgenommen:

- *»ohne Streu«*: In je drei Kammern wurde die Streuauflage entnommen, um nur die Atmung der Wurzeln und der Mikroorganismen im Mineralboden zu messen.
- *»ohne Wurzeln«*: Um drei weitere Kammern wurde ein Graben von 50 bis 70 Zentimeter Tiefe gezogen, alle Wurzeln durchtrennt und eine Teichfolie eingelegt, um ein Wiedereinwachsen von Wurzeln zu verhindern. Damit wird in diesen Kammern die Wurzelatmung ausgeschlossen und nur das CO₂ gemessen, welches durch die Atmung der Mikroorganismen entsteht.
- *»unbehandelt«*: Die letzten drei Kammern blieben zur Kontrolle unbehandelt. Hier werden also die gesamten, von lebenden Wurzeln oder Mikroorganismen freigesetzten CO₂-Mengen erhoben.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt beispielhaft alle an der Waldklimastation Flossenbürg gemessenen Flüsse. Grüne Punkte zeigen die Atmung des gesamten Bodens (*»unbehandelt«*), braune die Atmung des Mineralbodens ohne Streuauflage und blaue Punkte zeigen die CO₂-Freisetzung im Boden durch Mikroorganismen (*»ohne Wurzeln«*).

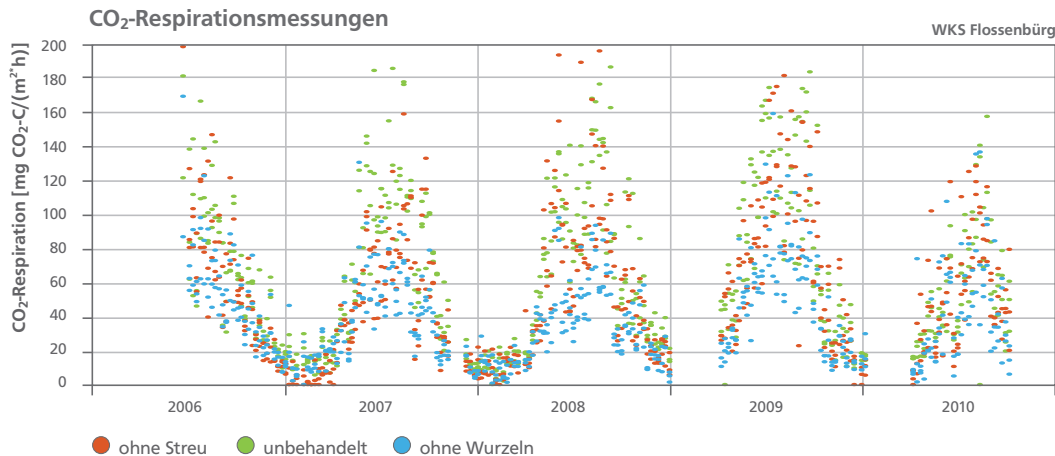


Abbildung 1: Respirationswerte ($\text{CO}_2\text{-C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) an der Waldklimastation Flossenbürg zwischen Juni 2006 und Oktober 2010

Die Respirationswerte streuen zeitlich und kleinräumlich sehr stark. Im Mittel über alle fünf Stationen werden stündlich 70 mg $\text{CO}_2\text{-C}$ je Quadratmeter veratmet. Die niedrigsten Werte gehen gegen Null, der höchste Fluss lag bei 500 mg $\text{CO}_2\text{-C}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Die Werte zeigen eine starke Temperaturabhängigkeit der Bodenatmung: Mit steigenden Temperaturen im Frühjahr steigt die Respiration an, erreicht Höchstwerte im Hochsommer und sinkt dann im Herbst stark ab.

Die verschiedenen Behandlungen führen in Flossenbürg zu einer erkennbaren Differenzierung. Die unbehandelten Kammern weisen wie erwartet meist die höchsten Werte auf, da sie die Gesamtatmung wiedergeben. Durch die Entnahme der Streu fehlt organisches Material, welches durch Pilze und Bakterien abgebaut werden kann – der CO_2 -Fluss verringert sich dadurch. Noch stärker reduziert ist das freigesetzte CO_2 , wenn die Wurzelatmung ausgeschlossen ist und nur der Abbau toten organischen Materials erfasst wird. Im Winter nähern sich die Werte der verschiedenen Behandlungen einander stark an, da die Bäume kaum oder keine Photosynthese betreiben und über die lebenden Wurzeln kaum noch CO_2 freigesetzt wird.

Auch die anderen Messstationen zeigen starke Schwankungen und eine deutliche Temperaturabhängigkeit. An drei Stationen (Altdorf, Ebersberg und Riedenburg) ist die Differenzierung zwischen den Behandlungen allerdings deutlich geringer ausgeprägt als an den Waldklimastationen Flossenbürg und Freising. Die starken räumlichen Schwankungen der Bodenatmung führen dazu, dass in einzelnen Kammern trotz fehlender Streuauflage oder fehlender Wurzelatmung die Flüsse höher liegen als in unbehandelten Messkammern.

Kohlenstoffumsatz im Boden

Da die Messungen nur einmal wöchentlich für kurze Zeit und auf geringer Fläche (1,6 m²) erfolgten, gibt ein Hochrechnen der Respiration auf ein Jahr nur eine grobe Vorstellung der Größenordnung, ganz besonders weil die fünf Stationen kein einheitliches Muster zeigen.

Die gesamte Bodenatmung kann Werte zwischen fünf und acht Tonnen Kohlenstoff pro Hektar und Jahr (t C/(ha*a)) er-

reichen. Der Anteil der autotrophen Respiration lag an den beiden Stationen Flossenbürg und Freising bei circa 40 Prozent, also zwischen zwei und drei Tonnen C/(ha*a). Somit werden drei bis fünf Tonnen C/(ha*a) des Kohlenstoffspeichers in Streuauflage und Mineralboden jährlich umgesetzt. Angesichts eines Gesamtvorrats im Boden von 280 Tonnen C in Flossenbürg bzw. 60 Tonnen in Freising sind das durchaus nennenswerte Anteile.

Diesen Verlusten durch den Abbau des Bodenkohlenstoffs steht der Eintrag über den Streufall gegenüber. Die Summe des jährlichen oberirdischen Streufalls (Nadeln bzw. Blätter, Früchte, Zweige) an den Waldklimastationen Flossenbürg und Freising liegt mit durchschnittlich 1,7 bzw. 2,7 Tonnen C deutlich unter den gemessenen Werten der abgebauten Kohlenstoffmengen im Boden. Das heißt jedoch nicht, dass der Bodenvorrat abgebaut wird, da über die »unterirdische Streu«, also über das Absterben von Fein- und Grobwurzeln, zusätzlich abgestorbenes Material zugeführt wird. Wenn ein ausgeglichenes Verhältnis von C-Zufuhr und C-Abbau vorausgesetzt wird, liegt die unterirdische Streu bei ein bis zwei Tonnen pro Hektar.

Der Beitrag der leicht abbaubaren Streuauflage zur gesamten Bodenrespiration lag an einer Station (Ebersberg) bei 30 Prozent, an zwei weiteren (Flossenbürg, Freising) bei über zehn Prozent. Auf die in der Streuauflage gespeicherten Kohlenstoffmengen bezogen, ergibt sich daraus eine mittlere Verweilzeit des Kohlenstoffs in der Streuauflage zwischen acht und 36 Jahren. Für den gesamten Bodenkohlenstoff errechnet sich aus Abbauraten und Vorräten der Waldklimastationen ei-

»Forest Focus« – Langzeit-Monitoring in der EU

Die Europäische Union verfolgte mit ihrer EU-Verordnung »Forest Focus« das Ziel, ein harmonisiertes und breit angelegtes Langzeit-Monitoring in europäischen Waldökosystemen einzurichten. Mit von der EU kofinanzierten sogenannten Demonstrationsvorhaben sollten die Möglichkeiten neuer Verfahren zum forstlichen Monitoring der Böden, der Kohlenstoffbindung und der Auswirkungen der Klimaänderung erprobt werden.

ne mittlere Verweilzeit zwischen zehn und 80 Jahren. Sie ist stark von der mittleren Jahrestemperatur abhängig: Umso kälter der Standort, desto länger die Verweilzeit.

Im Allgemeinen wird von einem Anstieg der Gesamtrespiration mit der Produktivität ausgegangen (z. B. Davidson et al. 2002). Die fünf Waldklimastationen zeigen diesen Trend nicht. Auffällig ist, dass der geringwüchsige Kiefernstandort Altdorf eine ähnlich hohe Gesamtrespiration hat wie die sehr wüchsige Station Freising mit ihrem Buchenbestand. Die Kiefern in Altdorf müssen offenbar einen deutlich höheren Anteil ihrer Assimilate in den Boden »pumpen«, um sich aus dem armen Sand mit Nährstoffen und Wasser zu versorgen.

Wie erwähnt steuert die Temperatur maßgeblich die zeitliche Dynamik der Bodenatmung. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Bodenfeuchte, die an den ausgewählten Stationen im Rahmen des Standard-WKS-Programms gemessen wird. Wenn es für die kohlenstoffabbauenden Mikroorganismen zu trocken oder zu feucht wird, ist ein Rückgang der Aktivitäten vorstellbar. An den Waldklimastationen konnte keine deutliche Abhängigkeit der Bodenrespiration von der Bodenfeuchte festgestellt werden. Am ehesten war die Auswirkung der Bodenfeuchte an der Waldklimastation Riedenburg zu messen, deren Boden am stärksten austrocknen kann. Die höchsten Flüsse wurden allgemein gemessen, wenn hohe Temperaturen und hohe Bodenfeuchte zusammenfielen. Ein Rückgang der Respiration bei Wasserüberschuss konnte nicht festgestellt werden.

Auswirkungen des Klimawandels

Die Abhängigkeit der Bodenatmung von der Temperatur legt nahe, dass sich der Klimawandel auf die Respirationraten auswirkt. Ob und in welchem Maße das geschieht, ist in der Wissenschaft umstritten. Die Auswirkung und mögliche Änderung weiterer Einflussfaktoren wie Bodenwassergehalt, Vegetationszusammensetzung und -struktur, photosynthetischer Aktivität oder der unterschiedliche Abbau von frischem, organischem Material gegenüber schon lange im Boden gebundenem Kohlenstoff erschweren die Vorhersagen (Grace und Janssens 2006; Subke et al. 2006; Borken und Beese 2005; Grace und Rayment 2000). Die WKS-Daten zeigen für klimatische Extremereignisse, zum Beispiel für den sehr milden Winter 2006/2007 oder für den sehr warmen April in den Jahren 2007 und 2009, keinen Anstieg der Respiration im Vergleich zu anderen Jahren. Wenn höhere Temperaturen und eine Verlängerung der Vegetationszeit zu einem erhöhten Abbau des Kohlenstoffs im Boden führen sollten, könnte dieser Verlust – ausreichende Wasserversorgung vorausgesetzt – durch eine erhöhte Biomasseproduktion der Wälder ausgeglichen werden. Neben der erhöhten Speicherung in der lebenden Biomasse würde dadurch auch die Streuproduktion zunehmen und die eventuellen Verluste im Boden ausgleichen (Lisky et al. 2002). Nach jetzigem Stand sind die Kohlenstoffspeicher in den Waldböden Bayerns stabil und werden eher auf- als abgebaut (Bolte et al. 2011; Schubert 2010).

Fazit

Ein Monitoring der Bodenrespiration im Wald ist mit einfachen Mitteln möglich. Angesichts der starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Werte müsste die Zahl der Messkammern pro Bestand allerdings deutlich erhöht werden, um repräsentative Aussagen zu erhalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Waldboden jährlich große Mengen Kohlenstoff umgesetzt werden. Solange die Zufuhr toten organischen Materials diese Verluste ausgleicht, findet keine Veränderung des Kohlenstoffvorrats im Boden statt. In nachhaltig bewirtschafteten, stabilen Wäldern kann zur Zeit davon ausgegangen werden.

Literatur

- Bolte, A.; Wellbrock, N.; Dunger, K. (2011): *Wälder, Klimaschutz, Klimaanpassung – Welche Maßnahmen sind umsetzbar?* AFZ-Der Wald 2; S. 27–30
- Borken, W.; Beese, F. (2005): *Soil respiration in pure and mixed stands of European beech and Norway spruce following removal of organic horizons*. Canadian Journal of Forest Research 35, S. 2756–2764
- Davidson, E; Bolstad, P.; Clark, D.; Curtis, P.; Ellsworth, D.; Hanson, P.; Luoh, Y.; Pregitzer, K.; Randolph, J.; Zakk, D. (2002): *Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements*. Agricultural and Forest Meteorology 113, S. 39–51
- Davidson, E.; Janssens, I. (2006): *Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change*. Nature 440, S. 165–173
- Grace, J.; Rayment, M. (2000): *Respiration in the balance*. Nature 404, S. 819–820
- Liski, J; Perruchoud, D.; Karjalainen, T. (2002): *Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe*. Forest Ecology and Management 169, S. 159–175
- Schubert, A. (2010): *Organisch gebundener Kohlenstoff im Waldboden*. LWF aktuell 78, S. 11–14
- Subke, J.A.; Inglima, I.; Cotrufo, M.F. (2006): *Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A meta-analytical review*. Global Change Biology 12, S. 921–943

Christoph Schulz und Dr. Daniel Klein sind Mitarbeiter in der Abteilung 2 »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft im Zentrum Wald-Forst-Holz; Dr. Daniel Klein bearbeitet das Projekt »Kohlenstoffbilanz der bayerischen Forst- und Holzwirtschaft«.
Christoph.Schulz@lwf.bayern.de, Daniel.Klein@lwf.bayern.de