



## Doctoral Thesis

# Soil respiration in a mixed mountain forest: environmental drivers and partitioning of component fluxes

**Author(s):**

Rühr, Nadine K.

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005811455> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**DISS. ETH NO. 18297**

**SOIL RESPIRATION IN A MIXED MOUNTAIN FOREST:  
ENVIRONMENTAL DRIVERS AND  
PARTITIONING OF COMPONENT FLUXES**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of

**Doctor of Sciences**

presented by

**NADINE KATRIN RÜHR**

Dipl.-Umweltwiss., University Duisburg-Essen

Born 26 August 1979

in Biberach/Riss, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

Prof. Dr. Ivan Janssens, co-examiner

2009

# Abstract

Soil respiration, a component flux of root-rhizosphere respiration and microbial decomposition, is the major source of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from terrestrial ecosystems to the atmosphere. Since soil respiration rates are generally found to increase with temperature there is a risk that higher temperatures as predicted for the next decades could probably alter the balance between CO<sub>2</sub> uptake and CO<sub>2</sub> release of terrestrial ecosystems, leading to a positive feedback on climate change. However, our understanding of underlying processes driving soil respiration is still insufficient to explicitly predict how this large CO<sub>2</sub> flux will react to climate change. Therefore, this thesis aims to further improve the understanding of environmental factors controlling soil respiration. Since soil respiration studies in mountain forests, which are thought to be relatively sensitive to climate change, are despite their broad distribution rather scarce, we studied soil, root-rhizosphere and microbial respiration in a mixed mountain forest (Lägeren), located at about 700 m in the Swiss Jura mountains. In addition, as summer droughts are expected to increase in frequency and soil respiration is found to be tightly coupled with assimilation, we examined the degree of coupling between recently assimilated carbon in the tree canopy and soil respiration under sufficient and under limited water supply.

Soil respiration (SR) was measured continuously with high temporal resolution (half-hourly) at one single point and periodically with high spatial resolution at 16 plots within the study site during 2006 and 2007. Seasonal and annual courses of manual and automated SR measurements could be modelled very well using soil temperature and if SR was water limited as during the summer drought 2006, including soil moisture in the model. Total annual SR for the study site was then estimated as 869 g C m<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup> for 2006 and as 907 g C m<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup> for 2007 (uncertainty <10% at the 95% confidence interval, determined by bootstrapping). Selected environmental conditions were assessed in more detail: (1) Rapid, but contrasting changes of SR were found after summer rainfall. Depending on soil moisture at pre-rain conditions, summer rain could either cause a pulse of CO<sub>2</sub> from the soil or an abrupt decrease of SR rates due to water logging of soil pores. (2) Two contrasting winter seasons resulted in SR being about 60–70% (31.2–44.6 g C m<sup>-2</sup>) higher during a mild winter (2007)

compared to a harsh winter (2006). (3) Analysing SR for selected periods on a diurnal scale revealed a counter-clockwise hysteresis with soil surface temperatures. This indication of a time-lagged response of SR to temperature was further supported by a very strong relationship ( $R^2=0.86\text{--}0.90$ ) of SR to soil temperature with a time-lag of 2 to 4 hours. Our results show that soil temperature and moisture models can provide good seasonal and annual estimates of soil CO<sub>2</sub> loss in mountain forests. However, not all temporal variations in SR could be explained by soil temperature and moisture, indicating that further environmental drivers might be involved.

For a better understanding of the underlying mechanisms of soil CO<sub>2</sub> loss, SR was partitioned into microbial respiration (MR) and root-rhizosphere respiration (RR) using small root exclusion treatments. Additionally, fine root respiration (FRR) was based on measurements of excised roots. RR and FRR were related to each other very well ( $R^2=0.94$ ,  $n=10$ ), with RR contributing about 46% and FRR about 32% to total SR. All soil respiratory fluxes were dependent on soil temperature ( $R^2=0.75\text{--}0.90$ ,  $n=27$ ), but differed in their temperature sensitivities. RR rates increased more strongly with temperature ( $Q_{10}=3.2$ ) than MR rates ( $Q_{10}=2.3$ ). Since the contribution of RR to SR was found to be higher during growing (50%) than during dormant periods (40%), we separated the 2-year data set accordingly. During the growing period of 2007, the temperature sensitivity of RR ( $Q_{10}=2.5$ ,  $R^2=0.62$ ) was similar to that of MR ( $Q_{10}=2.2$ ,  $R^2=0.57$ ). However, during the dormant period 2006/2007, RR was not related to soil temperature ( $R^2=0.44$ , n.s.), much in contrast to MR ( $Q_{10}=7.2$ ;  $R^2=0.92$ ). To better understand the underlying processes of the high  $Q_{10}$  of RR during the 2-years of measurements, we assessed the effect of green-up on root-rhizosphere respiration in more detail. RR increased by a factor of 4 from bud break to full leaf expansion and high photosynthetic activity, while soil temperature increased only by a factor of 1.5, leading to an extraordinary high  $Q_{10}$  of 10.6 during spring 2008. Meanwhile, the contribution of RR to SR increased from 29% to 47%, probably due to an increasing supply of recently assimilated carbon to the root-rhizosphere. Thus, high spring or annual  $Q_{10}$  values of RR seem not to reflect the true temperature sensitivity, but are rather caused by canopy assimilation and allocation belowground. Additionally, the results clearly showed that the temperature sensitivities of soil respiratory fluxes have to be interpreted carefully, as they strongly depend on the measurement period.

While recent studies have highlighted a direct and fast transfer of freshly-assimilated carbon from tree canopy to roots and soil microbes (of the rhizosphere), the response of this carbon flux to environmental conditions remains largely unknown. Therefore, we investigated the effect of drought on the translocation of recently assimilated carbon, using a <sup>13</sup>C pulse-labelling approach in 1.5-year old beech tree microcosms. During the first week after

---

pulse-labelling,  $^{13}\text{C}$  signatures were measured daily in leaves, twigs, coarse and fine root water-soluble and total organic matter, phloem organic matter, soil microbial biomass, as well as in soil  $\text{CO}_2$  efflux. Drought not only significantly reduced C assimilation, but also increased (+50%) the residence time of recently-assimilated C in leaf biomass during the first days after labelling. The  $^{13}\text{C}$  label peaked in phloem organic matter 4 days after labelling in the drought treatment, while it peaked immediately after labelling in the control treatment followed by an exponential decay. The label peaked in soil microbial biomass and in water-soluble organic matter of fine roots already 1 day after labelling in the control treatment. In contrast, in the drought treatment no peak was measured in soil microbial biomass and in fine root water-soluble organic matter a peak was measured just 8–10 days after labelling. These results indicate that under limited water supply, carbon translocation from source to sink organs is significantly slowed down in beech trees. In addition, the  $^{13}\text{C}$  excess in soil respiration was significantly reduced by 50% in the drought treatment 2 days after labelling, while total soil respiration was only decreased by 25%. Thus, decreased availability of recently assimilated C to soil microbial biomass and the lower contribution of this C to soil respiration clearly indicate a reduced coupling of canopy photosynthesis to below-ground processes under drought conditions. Furthermore, the drought-induced retardation and reduction of carbon transfer from the vegetation to the soil is likely to affect the carbon sequestration potential of forest ecosystems as well as their long-term carbon budget with increase in frequency of intensive summer droughts as predicted for the next decades.

The results presented in this thesis, showed that soil respiration and its component fluxes depend to a different extend on a couple of abiotic and biotic drivers. Nevertheless, empirical models including soil temperature and if appropriate soil moisture, seem to be able to estimate soil respiration rates very well for a mixed mountain forest if parameterised with measurements from that particular year. However, these models are not detailed enough to estimate soil  $\text{CO}_2$  loss under future climate conditions, since also biotic drivers of soil respiratory fluxes will be affected by climate change, such as phenology, photosynthesis and carbon allocation. Thus, to increase the reliability of predictions for the carbon sequestration potential of forest ecosystems under changing climate conditions, it is indispensable to consider root-rhizosphere and microbial respiration separately by global carbon models, together with their abiotic and biotic drivers.

# Zusammenfassung

Die Bodenrespiration, bestehend aus Wurzel-Rhizosphärenrespiration und mikrobieller Zersetzung, ist die grösste Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emission von terrestrischen Ökosystemen zur Atmosphäre. Da die Bodenrespiration generell mit ansteigenden Temperaturen zunimmt, könnte die Klimaerwärmung die Bilanz zwischen CO<sub>2</sub>-Aufnahme und CO<sub>2</sub>-Abgabe von Ökosystemen verändern. Falls sich die CO<sub>2</sub>-Abgabe durch die Bodenrespiration stärker erhöht als die CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Photosynthese, besteht die Gefahr einer positiven Rückkopplung auf den Klimawandel. Um jedoch eindeutige Voraussagen machen zu können, ist unser Verständnis von den Prozessen die die Bodenrespiration beeinflussen bisher nicht ausreichend. Das Ziel meiner Doktorarbeit ist es deshalb unser Verständnis von Umweltfaktoren, welche die Bodenrespiration kontrollieren, zu verbessern. Trotz der grossen Verbreitung von Bergwäldern mit ihrer Sensibilität gegenüber dem Klimawandel, sind Studien zur Bodenrespiration in Bergwäldern eher selten. Deshalb haben wir die Bodenrespiration, Wurzel-Rhizosphärenrespiration und mikrobielle Respiration in einem Berg-Mischwald (Lägeren) des Schweizer Juras in ungefähr 700 m ü.N.N. untersucht. Da des Weiteren angenommen werden kann, dass Trockenperioden im Sommer zunehmen werden und die Bodenrespiration auch stark mit der Assimilation in der Baumkrone zusammenhängen kann, haben wir die Intensität dieses Zusammenhangs bei ausreichender und bei limitierter Wasserversorgung gemessen.

Die Bodenrespiration wurde im Untersuchungsgebiet Lägeren an einer Stelle kontinuierlich (halbstündlich) mit einer hohen zeitlichen Auflösung und an 16 weiteren Stellen periodisch mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen. Saisonale und jährliche Verläufe von manuellen und automatischen Bodenrespirationmessungen konnten sehr gut mit der Bodentemperatur modelliert werden. Wenn die Bodenrespiration wasserlimitiert war, wie während der Sommertrockenheit in 2006, wurde die Bodenfeuchte in das Modell mit einbezogen. Die jährliche Bodenrespirationsrate für das Untersuchungsgebiet wurde für 2006 auf 869 g C m<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup> und für 2007 auf 907 g C m<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup> geschätzt (Unsicherheit <10% im 95% Konfidenzintervall, bestimmt mit Bootstrapping). Des Weiteren wurden ausgewählte Umweltbedingungen genauer untersucht: (1) Nach starkem Sommerregen veränderten sich



die Bodenrespirationsraten sofort, abhängig von der Bodenfeuchte vor dem Einsetzen des Regens, gab es entweder einen hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß oder eine sofortige Abnahme der Bodenrespiration. (2) Im milden Winter des Jahres 2007 war die Bodenrespiration ungefähr 60–70% höher (31.2–44.6 g C m<sup>-2</sup>) als während des strengen Winters in 2006. (3) Die Analyse des Tagesgangs der Bodenrespiration während ausgewählter Perioden zeigte eine Hysterese gegen den Uhrzeigersinn mit der Bodenoberflächentemperatur. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die Bodenrespiration mit einer Zeitverzögerung von 2 bis 4 Stunden auf die Bodentemperatur reagiert ( $R^2=0.86-0.90$ ). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Modelle mit Bodentemperatur und Bodenfeuchte sehr gut den saisonalen und jährlichen CO<sub>2</sub>-Verlust von Böden in Bergwäldern simulieren können. Sie zeigen aber auch, dass die Bodenrespiration von weiteren Umweltfaktoren beeinflusst wird, da nicht alle zeitlichen Variationen mit Bodentemperatur und -feuchte zu erklären sind.

Um die Prozesse des CO<sub>2</sub>-Verlusts von Böden besser zu verstehen, haben wir die Bodenrespiration in Wurzel-Rhizosphärenrespiration (RR) und mikrobielle Respiration (MR) getrennt indem wir das Wurzelwachstum in kleinen Bereichen des Waldbodens verhinderten. Zusätzlich haben wir auch die Feinwurzelrespiration (FRR) an aus dem Boden entnommenen Wurzeln gemessen. Die RR und die FRR waren gut miteinander korreliert ( $R^2=0.94$ ,  $n=10$ ), wobei die RR ungefähr 46% und die FRR ungefähr 32% zur gesamten Bodenrespiration beitrugen. Alle Bodenrespirationsflüsse waren temperaturabhängig ( $R^2=0.75-0.90$ ,  $n=27$ ), unterschieden sich aber in ihrer Temperaturempfindlichkeit. Die RR stieg anscheinend stärker mit der Temperatur an ( $Q_{10}=3.2$ ) als die MR ( $Q_{10}=2.3$ ). Da der Anteil von der RR an der Bodenrespiration während der Wachstumsperiode der Bäume höher war (50%) als in deren Ruheperiode (40%), wurde die Temperaturempfindlichkeit der RR und der MR für jede Periode einzeln erfasst. In der Wachstumsperiode in 2007 zeigte sich die RR etwas weniger temperaturempfindlich ( $Q_{10}=2.5$ ,  $R^2=0.62$ ) und in der Ruhephase 2006/2007 konnte sogar kein signifikanter Zusammenhang zwischen der RR und der Temperatur nachgewiesen werden ( $R^2=0.44$ , n.s.), während dagegen die MR eine starke Temperaturempfindlichkeit aufzeigte ( $Q_{10}=7.2$ ;  $R^2=0.92$ ). Um zu untersuchen ob die Substratverfügbarkeit die hohen  $Q_{10}$ -Werte von der RR teilweise erklären könnte, wurde der Effekt des Blattaustriebes (und damit ansteigender Photosynthese und Substratverfügbarkeit) im Frühjahr 2008 auf die RR untersucht. Die RR nahm vom Beginn des Blattaustriebes bis zur vollständigen Blattentfaltung um den Faktor 4 zu, während sich die Bodenrespiration nur um den Faktor 1.5 erhöhte, was zu einem ausserordentlich hohen  $Q_{10}$ -Wert von 10.6 führte. Zwischenzeitlich erhöhte sich auch der Anteil der RR an der Bodenrespiration von 29% auf 47%, wahrscheinlich verursacht durch das erhöhte Angebot und die Zufuhr von neu assimiliertem Kohlenstoff zu Wurzeln und via Wurzelexudaten zur Rhizosphäre. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass

---

die hohen  $Q_{10}$ -Werte für die RR nicht deren wirkliche Temperaturempfindlichkeit darstellen, sondern eher durch Assimilation und Allokation beeinflusst werden. Diese Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Temperaturabhängigkeiten der Bodenrespirationsflüsse vorsichtig interpretiert werden müssen, da sie eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit aufweisen.

Während neueste Studien einen direkten und schnellen Transport von neu assimiliertem Kohlenstoff (C) von der Baumkrone zu den Wurzeln und den Bodenmikroben aufgezeigt haben, ist die Auswirkung von Umweltfaktoren auf diesen C-Fluss grösstenteils unbekannt. Deshalb haben wir die Auswirkung von Trockenheit auf den Transport von neu assimiliertem Kohlenstoff mit einer  $^{13}\text{CO}_2$ -Pulsmarkierung (pulse-labelling") bei 1.5 Jahre alten Buchen-Mikrokosmen untersucht. Während der ersten Woche nach der Pulsmarkierung, wurde das  $^{13}\text{C}$  täglich in der wasserlöslichen und der gesamten organischen Materie von Blättern, Zweigen, Grob- und Feinwurzeln und in der organischen Materie des Phloems, mikrobieller Biomasse und Bodenrespiration gemessen. Die Trockenheit hat nicht nur signifikant die Assimilation von C verringert, sondern auch die Verweildauer von neu-assimilierten C in den Blättern während der ersten Tage nach der Markierung stark erhöht. Bei der Trockenbehandlung erreichte der  $^{13}\text{C}$ -Wert in der organischen Materie des Phloems 4 Tage nach der Pulsmarkierung sein Maximum, während in der Kontrolle der  $^{13}\text{C}$ -Wert sofort nach der Pulsmarkierung am höchsten war und danach exponentiell abnahm. In der mikrobiellen Biomasse und in der wasserlöslichen organischen Materie von Feinwurzeln der Kontrollbehandlung erreichte bereits nach einem Tag der  $^{13}\text{C}$ -Wert sein Maximum. Im Gegensatz dazu wurde in der Trockenbehandlung kein  $^{13}\text{C}$ -Maximum in der mikrobiellen Biomasse gefunden und in der wasserlöslichen organischen Materie der Feinwurzeln erst nach 8 bis 10 Tagen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass unter Trockenbedingungen der C-Transport vom Blatt zum Boden signifikant reduziert ist. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass bei der Trockenbehandlung auch der  $^{13}\text{C}$ -Excesswert der Bodenrespiration 2 Tage nach der Pulsmarkierung um 50% reduziert war, während die gesamte Bodenrespirationrate nur um 25% kleiner war als die der Kontrolle. Die reduzierte Verfügbarkeit von neu assimiliertem C für die mikrobielle Biomasse und der geringere Anteil an neuem C an der gesamten Bodenrespiration weisen auf einen geringeren Zusammenhang von neu assimilierten C und Bodenprozessen während Trockenheit hin. Des Weiteren scheint die durch die Trockenheit verursachte Verzögerung und Reduktion des C-Transports von der Vegetation zum Boden, sowohl das Potential der Kohlenstoffsequestration von Waldökosystemen als auch ihr Langzeit Kohlenstoffbudget zu beeinflussen, wenn sich die Häufigkeit von Sommerdürren, wie für die nächsten Jahrzehnte vorausgesagt, erhöhen wird.

Die Ergebnisse der vorliegenden Doktorarbeit zeigen, dass die Bodenrespiration und ihre Teilflüsse zu einem unterschiedlichen Masse von abiotischen und biotischen Faktoren



abhängen. Trotzdem scheinen empirische Modelle die Bodentemperatur und falls nötig Bodenfeuchte enthalten, sehr gut die Bodenrespirationsraten eines Berg-Misch-Waldes abzuschätzen, wenn sie mit Messungen des entsprechenden Jahres parameterisiert werden. Diese Modelle sind aber nicht detailliert genug um CO<sub>2</sub>-Respirationsraten von Böden unter künftigen Klimabedingungen vorauszusagen, da auch biotische Faktoren die die Bodenrespirationen kontrollieren vom Klimawandel betroffen sind, wie auch die Phänologie, die Photosynthese oder auch der C-Transport von der Pflanze zum Boden. Die Ergebnisse meiner Doktorarbeit zeigen, dass die Wurzel-Rhizosphärenrespiration und die mikrobielle Respiration separat mit Bezug zu ihren kontrollierenden abiotischen und biotischen Umweltfaktoren in Kohlenstoffmodelle integriert werden müssen, damit eine verlässlichere Abschätzung des Kohlenstoffsequestrationpotentials von Wäldern unter zukünftigen Klimabedingungen gemacht werden kann.