

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee

von

P. Trüby
Albert-Ludwigs-Universität
Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre

Förderkennzeichen: 1 95 003

Die Arbeiten des Projektes "Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung"
wurden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2000

CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee

Zusammenfassung

In einem 50-jährigen Fichtenbestand des Südschwarzwaldes wurde die Bodenrespiration über einen Zeitraum von insgesamt 5 Jahren mittels Kammertechnik kontinuierlich gemessen. Die Messung der CO₂-Konzentration erfolgte in 3-stündigen Zyklen mit einem Infrarot-Analysator (BINOS 100). Ziel war die Erstellung einer auf aktuellen Flüssen basierenden C-Bilanz. Zentraler Teil dabei war die experimentelle Quantifizierung der Wurzelrespiration. Diese wird zur indirekten Bestimmung des C-Eintrages benötigt. Das Experiment basierte auf dem Vergleich eines ungestörten, normal durchwurzelten Bodenausschnittes mit einem „wurzelfreien“, bei dem die Wurzeln vollständig gekappt wurden.

Die CO₂-Emission zeigt einen ausgeprägten, von der Boden- bzw. Lufttemperatur maßgeblich bestimmten Jahresgang mit einem Emissionsmaximum im Zeitraum August-September. Hier treten Emissionsspitzen bis 1000 mg CO₂ / m²* h auf. Im Winter sinken die Werte auf ein Niveau <100 mg CO₂ / m²* h ab. Der mittlere jährliche C-Austrag (1997/98) betrug 6.5 bzw. 5.8 t C / ha*a.

Die experimentell bestimmte Wurzelrespiration betrug im Jahresmittel etwa 30% der Gesamtemission. In den Sommermonaten waren die Anteile stets am größten. Die durch die Wurzelkappung zusätzlich erzeugte Wurzelnekromasse hat offenbar keinen erkennbaren Mineralisierungsschub ausgelöst. Die Wurzelinventur zeigte, daß die Nekromasse im Zeitraum von 5 Jahren nur um 1 t C / ha abgenommen hat, was einer maximalen jährlichen CO₂-Freisetzung von 0.2 t C entspricht. Es ergaben sich somit keine Hinweise auf eine experimentell bedingte substantielle Verfälschung der Ergebnisse.

Die erstellte C-Bilanz des Bodens ist für beide Meßjahre (1997/98) negativ, was einen Humusvorratsabbau indiziert. Wegen der Verwendung von Schätzgrößen ist die Bilanz mit beträchtlichen Unschärfen behaftet. Die berechneten jährlichen Vorratsänderungen von 1.6 bzw. 1.5 t C / ha*a haben deshalb nur die Qualität einer Schätzung.

Als Ursachen für den verstärkten Humusabbau kommen erhöhte N-Einträge, die vorangegangene Bestandesumwandlung von Buche zu Fichte und nicht zuletzt eine an die Bestandesentwicklung gekoppelte Variation essentieller Ein- und Austragsgrößen in Betracht.

Summary

CO₂-emission and C-turnover in the soil of the ARINUS-site Schluchsee (Black Forest)

Soil respiration was determined continuously during a 5 years period in a 50 year old Norway Spruce stand from the Southern Black Forest. For the measurement of CO₂-emission 5 temporarily closed chambers were installed on each plot. CO₂-concentrations were analysed every 3 hours by an infrared-analyzer (BINOS 100). The investigation was focussed on the C-balance based on actual fluxes of litter fall, root increment, fine root turnover, root respiration, and total CO₂-emission.

The main part of the investigation was the determination of root respiration by a trenching experiment. Root respiration was calculated from the total soil respiration and the respiration of the trenched soil compartment.

CO₂-emission was controlled mainly by soil and air temperature, respectively. The mean monthly fluxes varied from 70 to 546 CO₂ / m²*h. Maximum fluxes occurred in August and

September. A low level respiration ($< 100 \text{ mg CO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$) was maintained during winter. The spatial variation of CO_2 -emission was relatively low. The coefficients of variation based on 5 replications were lower than 10%.

In the period 1997/98 total soil respiration amounted to 6.5 and 5.8 t C / ha*a, respectively. Regarding to literature data the annual respiration rates are on a mean level.

The mean contribution of root respiration to total soil respiration was 30%. The highest values were found during summer. The amount of root respiration was not affected substantially by additional necromass from trenching. During 5 years the loss of root necromass was 1t/ha, corresponding with a mean CO_2 -emission of 0.2 t C / ha*a. Thus there is no indication on a severe systematic error of the trenching experiment.

Soil carbon balance was negative, indicating a loss of soil organic matter. Due to the usage of estimated values the balance is affected with several uncertainties. So the calculated loss of carbon (1.5 - 1.6 t C / ha*a) has the quality of an estimation, only.

Increased N-inputs from atmosphere, the change from a beech stand to a spruce stand, and the variation of essential input or output compounds corresponding with the stand development were discussed as the main reasons for the loss of soil organic matter.

1. Kohlenstoffhaushalt von Waldböden

Die biogene CO₂-Emission ist eine essentielle Komponente im C-Haushalt von Waldböden. Sie beeinflusst sowohl die ökosystemare als auch die globale C-Bilanz maßgeblich (SCHNEIDER, 1989). Die daran beteiligten Prozesse im Boden sind Wurzelrespiration, Humifizierung und Mineralisierung. Letztere bestimmen den Humusvorrat und dessen Qualität. Sie beeinflussen damit indirekt alle wichtigen Bodenfunktionen, wie z.B. die Bereitstellung von Wasser und Nährstoffen. Die C-Umsatzraten hängen u.a. ab vom Klima, der Witterung, den Bodeneigenschaften und der Bewirtschaftungsform. Zu aktuellen Umsätzen an konkreten Waldstandorten ist bisher nur wenig bekannt.

Waldökosysteme sind seit einigen Jahrzehnten erhöhten Säure- und Stickstoffeinträgen ausgesetzt, was teilweise zu erheblichen Veränderungen im ökosystemaren Stoffkreislauf geführt hat (ULRICH et al., 1979; MATZNER, 1987). Dies äußert sich oft in einer allmählichen Basenverarmung, die sich je nach Standort nachhaltig auf die Mineralstoff-, insbesondere die Mg-Versorgung ausgewirkt hat (HÜTTL, 1985; 1991; FEGER, 1993). Darüber hinaus zeigt sich infolge einer zunehmenden N-Eutrophierung ein allmählicher Wandel der Humusformen zugunsten des Mullhumus (MÜHLHÄUSER, 1980; GERBOTH, 1998). Ein Humusverlust infolge erhöhter Mineralisierung ist dabei nicht auszuschließen. Außerdem wird zur Kompensation der Säureeinträge und zum Ausgleich eventueller Mg/(Ca)-Defizite großflächig gekalkt, was eine Stimulation der biologischen Aktivität erwarten läßt (ALDINGER, 1987; BRUMME & BEESE, 1993). Bewirkt dies neben dem zu erwartenden Humusumbau auch einen Mineralisierungsschub, so können beträchtliche C-Verluste auftreten, die zu einer nachhaltigen Verschlechterung der physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften führen können. Nach ULRICH & KEUFFEL (1970) und SEIBT et al. (1977) können die C-Verluste durch Kalkung mit 5 t CaCO₃ bis zu 20 t/ha betragen. Bei anderen Untersuchungen scheinen die C-Verluste wesentlich geringer (MILLER, 1964; BAUM, 1979; MATZNER, 1985), so daß die Befunde insgesamt widersprüchlich sind. Es besteht daher ein Interesse an der zuverlässigen Erfassung potentieller Veränderungen im C-Haushalt von Waldökosystemen.

Im Rahmen des ARINUS-Projektes wurde seit 1986 eine breit angelegte interdisziplinäre Stoffhaushaltsstudie durchgeführt. Deren Ziel war es, die Auswirkungen von atmogenen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern zu untersuchen. Das Kernprojekt ist inzwischen abgeschlossen. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse findet sich bei RASPE et al. (1998). Diese Studie wurde 1990

durch das vom BMFT geförderte FEELING-Projekt (ZÖTTL, unveröffentlicht) ergänzt. Ziel war es, in einem weiteren Wassereinzugsgebiet auch die Auswirkungen von Kalkungsmaßnahmen auf den Stoffhaushalt zu erfassen. In beiden Studien blieb der C-Haushalt zunächst unberücksichtigt. Erst in der zweiten Projektphase war es schließlich möglich in das Kalkungsexperiment Untersuchungen zum Kohlenstoffhaushalt miteinzubeziehen. Die Ergebnisse sind im bisher unveröffentlichten Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben (BMFT 0 3392 79A) und bei RASPE et al. (1998) dargestellt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Bodenrespirationsmessungen findet sich im Kapitel 5 „Vorarbeiten im ARINUS/FEELING-Projekt“.

2. Stand der Forschung

In den älteren Waldökosystemstudien wird der C-Haushalt meist nur marginal behandelt (FEGER, 1993; KREUTZER & GÖTTLEIN, 1991; ULRICH et al. 1979). Die Untersuchungen dazu beschränken sich i.a. auf die Erfassung von Humusvorratsänderungen durch wiederholte C-Inventuren. Dies ist nur für längere Zeiträume mit befriedigender Genauigkeit möglich (ALDINGER, 1987). Zudem liefern derartige Bilanzen keine Informationen über die Dynamik der im Boden ablaufenden Prozesse.

Anders als bei den meisten Nährelementen sind beim Kohlenstoffhaushalt essentielle Eintragskomponenten an die Gasphase und komplexe Transportprozesse in der Vegetation gekoppelt. Eine direkte Messung der Einträge ist dadurch nicht möglich, ohne das System gravierend zu stören. Es ist deshalb verständlich, daß bisher kaum auf Umsatzmessungen basierende vollständige C-Bilanzen existieren (VOGT, 1991).

Zum Monitoring der C-Umsätze im Boden wird oft die relativ einfach meßbare CO₂-Emission verwendet. Damit ist es zumindest möglich die C-Dynamik im Boden zu beleuchten und den gasförmigen C-Austrag aus dem System in Abhängigkeit von bestimmten Witterungs- und Bestandesfaktoren zu quantifizieren (BRUMME, 1995; TRÜBY, 1996; SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND, 1998). Im Rahmen des Solling-Projektes bestimmten BRUMME & BEESE (1993) über längere Zeiträume die Bodenrespiration mittels Kammer-technik. Ziel war, die Auswirkungen einer experimentellen Kalkung auf den C-Umsatz im Boden zu erfassen. Die Untersuchung beschränkte sich allerdings auf die Bestimmung der Gesamtemission aus dem Boden. Eine C-Bilanz wurde nicht erstellt, da essentielle Eintragskomponenten nicht quantifiziert werden konnten. In neueren Untersuchungen finden sich zunehmend Ansätze zur Quantifizierung der Wurzelrespiration und zur C-Bilanzierung. Die

verwendeten Methoden sind sehr verschieden. Dementsprechend heterogen sind die Resultate. Eine Literaturübersicht über den Anteil der Wurzelrespiration and der Gesamtrespiration geben UCHIDA et al. (1998). LARIONOVA et al. (1998) ermittelten die Wurzelrespiration durch Inkubationsversuche mit ungestörten und wurzelfreien Bodenmonolithen. Für die Waldböden betragen die Anteile an der Gesamtrespiration im Mittel 37%. Wegen der großen zeitlichen Variation erscheinen die Werte allerdings wenig verlässlich. THIERRON & LAUDELOUT (1996) modellieren die Wurzelrespiration für einen Eichenmischwald auf einem „Dystrochrept“ in Belgien anhand von Laborversuchen. Danach stammen 90% der Gesamtemission aus der Wurzelrespiration. Diese Werte liegen weit außerhalb des aus der Literatur bekannten Rahmens. Die von BOWDEN et al. (1993) und EPRON et al. (1999) durchgeführten Experimente zur Quantifizierung der Wurzelrespiration basieren auf dem Vergleich von durchwurzelter und wurzelfreier Bodenausschnitten. BOWDEN et al. (1993) legten umfangreiche Langzeitexperimente im Harvard Forest Massachusetts an. Ziel war es, den Beitrag der Laub/Nadelstreu, der Wurzelstreu und der Wurzelrespiration zur gesamten Bodenrespiration zu erfassen. Der aus der Differenz der Varianten „durchwurzelt“ - „wurzelfrei“ ermittelte Anteil der Wurzelrespiration betrug 33% der Gesamtrespiration. Ein durch die Wurzelkapung möglicherweise ausgelöster Mineralisierungsschub blieb dabei unberücksichtigt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch EPRON et al. (1999). Sie korrigieren diesen Anteil jedoch rechnerisch auf das Doppelte (60%) und begründen dies mit der Mineralisierung zusätzlich angelieferter Nekromasse.

Eine ausführliche Beschreibung des Kohlenstoffhaushalts der Pflanzen(decke) aus physiologischer Sicht findet sich bei LARCHER (1994). Auch hier finden sich jedoch kaum allgemein verwertbare Angaben zur Wurzelrespiration. Die für einen 60-jährigen Buchenbestand Dänemarks und einen „tropischen Regenwald“ dargestellten C-Bilanzen basieren auf älteren Untersuchungen (MAR-MÖLLER et al., 1954; KIRA et al., 1964; YODA, 1967). Danach beträgt die Wurzelrespiration nur ein Bruchteil der Gesamtrespiration der oberirdischen Biomasse. Die Verlässlichkeit dieser Daten kann allerdings nicht geprüft werden. Wesentlich fundierteres Wissen besteht hingegen für den C-Haushalt der oberirdischen Biomasse. Wenngleich eine Übertragung auf die Wurzeln nur sehr eingeschränkt möglich ist, bietet sich zumindest die Möglichkeit die Plausibilität der eigenen Ergebnisse zu überprüfen.

3. Ziel

Das Projekt konzentriert sich auf den C-Haushalt des Bodens. Hauptziel ist die Erstellung einer auf aktuellen Umsätzen basierenden C-Bilanz des Bodens. Darüber hinaus sollen mehr

grundlegende Erkenntnisse zur C-Dynamik gewonnen und Wirkungsmechanismen aufgeklärt werden. Im einzelnen sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Wie groß ist die CO₂-Emission aus dem Boden am ARINUS-Standort Schluchsee?
- Welcher zeitlichen Dynamik unterliegt die CO₂-Emission?
- Wie beeinflussen Bodenfeuchte und Bodentemperatur die CO₂-Emission?
- Welcher Anteil der gesamten CO₂-Produktion im Boden entfällt auf den Wurzelumsatz und die -respiration?
- Wie lautet die C-Bilanz des Bodens?

4. Material und Methoden

Eine detaillierte Formulierung der Untersuchungsziele und eine Übersicht über den experimentellen Ansatz des gesamten ARINUS-Projektes findet sich bei RASPE et al. (1998, S. 5-66). Die hier dargestellten Untersuchungen zum C-Haushalt wurden nachträglich in dieses Projekt integriert. Der methodische Ansatz basiert deshalb auf den Vorgaben des ARINUS-Experiments. Dementsprechend wurden die Bodenrespirationsmessungen auf den bereits angelegten Flächen Kalkung (S 4) und Kontrolle (S 1) durchgeführt. Das anschließende Wurzel-experiment wurde unabhängig von experimentellen Eingriffen ausschließlich auf der Kontrollfläche durchgeführt.

Eine Übersicht über ausgewählte Standorts- und Bodendaten gibt Tabelle 1. Die Kalkung mit 4t Dolomitgranulat führte zu einem deutlichen pH-Anstieg in der Auflage und im Ahe-Horizont (Tab. 1). Die zeitliche Entwicklung zeigt, daß sich die Basizität allmählich in den oberen Mineralboden verlagert. Der ausgebrachte Kalk löste sich zunächst langsam. Zwei Jahre nach der Düngung waren noch etwa $\frac{3}{4}$ des ausgebrachten Kalks vorhanden (RASPE et al., 1998). Im Jahr 1995 waren es nur noch etwa 10%. Zu Beginn der Respirationsmessungen war demnach der ausgebrachte Kalk weitgehend umgesetzt. Die damit verbundene Freisetzung von CO₂ ist im Hinblick auf die Bodenrespiration vernachlässigbar gering.

Tabelle 1: Standorts- und Bodenparameter

		Kontrolle (S 1)	Kalkung (S 4)		
Höhe über NN		1.205 m	1.207 mm		
Exposition		ENE	ESE		
Jahresniederschlag Ø 1988-1996			1.870 mm		
Jahrestemperatur Ø 1988-1996			4.4 °C		
Bestand/Alter		Fichte 50-70	Fichte 70-90		
Bodentyp:		(Humus-Eisen) Podsol			
Substrat:		Bärhaldegranit			
Humusform:		mullartiger Moder bis F-Mull			
Horizont	Mächtigkeit (cm)	pH (H ₂ O) nach RASPE et al. (1998)			
		Kontrolle	Kalkung		
			1989	1992	1995
Auflage	~ 5	3.6	3.6	5.3	4.9
Ahe	30	3.7	3.5	3.8	4.1
B(s,h)v	50	4.7	4.7	4.7	4.8

Tabelle 2: Versuchsdesign

Kontrolle S 1		Kalkung S 4
keine Behandlung		4t Dolomitgranulat (10/1990)
5 Kammern (1993)		5 Kammern (1993)
<i>Einbaurahmen</i>		<i>Einbaurahmen</i>
Kappung der Wurzeln im Oberboden (0-6cm)		Kappung der Wurzeln im Oberboden (0-6cm)
S 1/1	S 1/2	S 4
keine Veränderung	5 Kammern Einbau 1996 <i>Aufsatzrahmen</i> keine Störung	keine Veränderung
Oktober 1996 vollständige Wurzelkappung	keine Änderung	November 1996 vollständige Wurzelkappung

Die im Rahmen des FEELING-Projektes begonnenen Respirationmessungen waren auf die Erfassung von Kalkungseffekten ausgelegt. Die auf der Kontroll- und Kalkungsfläche vorhandenen Meßanlagen wurden in das Anschluß-Projekt integriert (vgl. Tab. 2). Die ersten Kammern wurden auf abgewinkelten, unten angeschärften Edelstahlrahmen fixiert, die ca. 5 cm in den Oberboden eingetrieben wurden. Alle oberflächennahen Wurzeln sind dabei gekappt worden. Die Meßanordnung erfaßt somit die Respiration nicht mehr vollständig, da Wurzelrespiration und Feinwurzelumsatz teilweise eliminiert waren. Für die beabsichtigte Erfassung von Kalkungseffekten ist dies allerdings ohne Belang.

Für das „Wurzelexperiment“ ist im Jahr 1996 auf der Kontrollfläche die Variante S 1/2 nachinstalliert worden. Die neuen Kammern wurden auf Flachrahmen fixiert, die ohne Bodenstörung und ohne Beeinträchtigung der Wurzeln auf die Bodenoberfläche aufgesetzt wurden. Zur Abdichtung des Systems wurden seitlich angebrachte Gummimanschetten an die Streulage angepresst. Die gemessene CO₂-Emission entspricht somit der Gesamtrespiration des Bodens. Ziel des Wurzelexperiments war es, den Anteil der Wurzelrespiration und des Feinwurzelumsatzes zu quantifizieren. Dieser entspricht der Differenz der Emission der Varianten S 1/2 und S 1/1. Diese Differenz ist mit dem gesamten aus der räumlichen Varianz resultierenden Meßfehler behaftet. Eventuell auftretende, systematische Abweichungen beider Flächen würden somit Versuchseffekte lediglich vortäuschen. Das Experiment wurde deshalb mit einer halbjährigen Vorlaufphase durchgeführt. Die vollständige Kappung der Wurzeln erfolgte schließlich im Spätjahr 1996 auf den Teilflächen S 1/1 und S 4 (vgl. TRÜBY, 1997), wo schon beim Einbau die oberflächennahen Wurzeln gekappt wurden (vgl. Tab. 2). Der Zeitraum in dem eine erhöhte CO₂-Produktion (vgl. TRÜBY, 1996) durch ein zusätzliches Angebot an leicht mineralisierbarer Wurzelnekromasse auftreten könnte, wird dadurch erheblich verkürzt.

Meßtechnik

Die Messung der Bodenrespiration erfolgte mit Plexiglaskammern, die zur Messung für 300 sec. geschlossen wurden (Abb. 1). Der Meßgasstrom wird einem CO₂-Analysator (BINOS 100) zugeführt und danach in die Kammer zurückgeleitet. Der Kammer wird kein Gas entzogen. Zur Minimierung der Leitungslängen werden jeweils 5 Kammern über ein rechnergestütztes Verteilungs- und Steuersystem betrieben. Die Leitungen wurden jeweils vor dem Meßbeginn mit Umgebungsluft durchgespült, um Kondensatbildung und memory-Effekte auszuschließen.



Abbildung 1: Messkammer in geschlossenem Zustand.

Die Messung der CO_2 -Konzentration erfolgte simultan mit einer Zeitauflösung von 3 Sekunden. Dies ermöglicht eine zuverlässige Qualitätskontrolle. Die Originalmeßreihen belegen (Abb. 2), daß die Konzentration nach dem Schließen der Kammer linear ansteigt, was die Berechnung der Konzentrationsänderung sehr erleichtert.

Zielgröße der Messung war die zeitliche Änderung der CO_2 -Konzentration und nicht die absolute CO_2 -Konzentration. Die Meßanordnung ist dadurch unempfindlich gegen kleinere Kalibrierfehler. Die CO_2 -Flüsse wurden aus dem Quotienten dc/dt für mittlere Druck- und Temperaturbedingungen des Standorts berechnet.

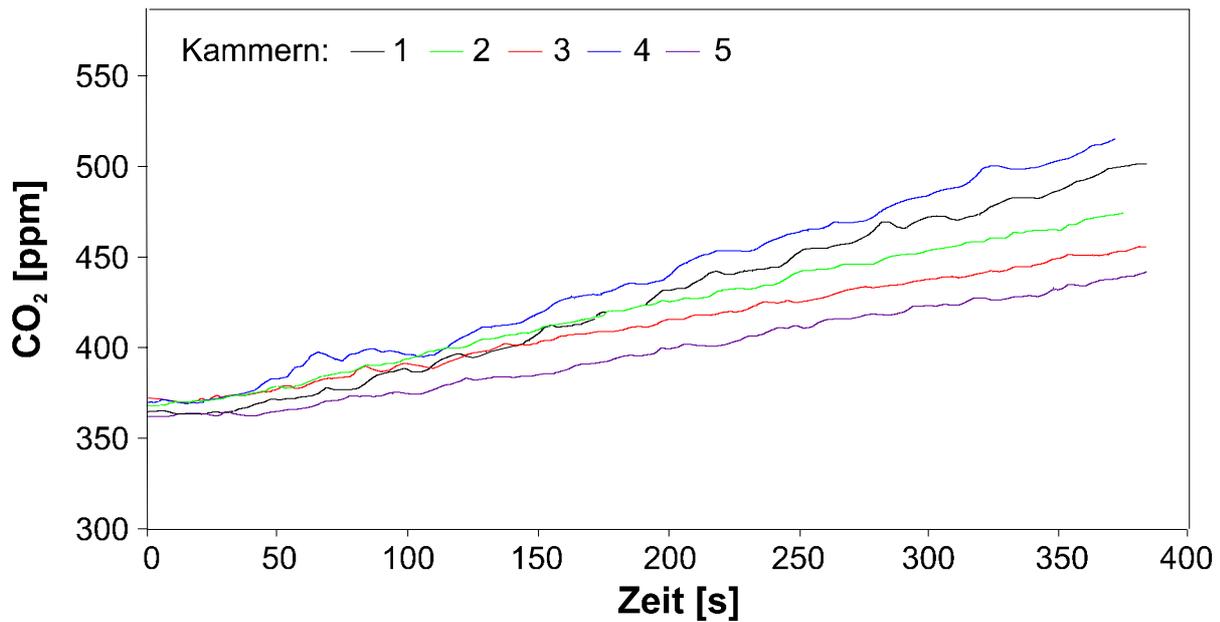


Abbildung 2: Anstieg der CO₂ - Konzentration in den Kammern während der Messung

Bilanzierungsansatz

Mit Ausnahme des C-Umsatzes durch die unterirdische Biomasse sind alle Komponenten der C-Bilanz meßbar. Der Streufall sowie der Austrag an DOC und HCO₃ wurden mit den laufenden ARINUS-Messungen kontinuierlich erhoben, die aktuelle CO₂-Emission wurde im Rahmen dieser Untersuchung gemessen. Die Emission anderer gasförmiger C-Verbindungen bewegt sich im Spurenbereich. Sie spielen in der C-Bilanz zumindest auf diesem Standort eine untergeordnete Rolle.

Nicht meßbar ist hingegen der Eintrag über den Zustrom von Assimilaten, die zum Aufbau und Umsatz der Feinwurzelmasse und für die Wurzelrespiration verbraucht werden. Der Eintrag kann deshalb nur indirekt aus dem Wurzelzuwachs, dem Feinwurzelumsatz und der Wurzelrespiration ermittelt werden. Während der Zuwachs an dauerhaften größeren Wurzeln aus den Vorratsaufnahmen von RASPE (1992) berechnet wird, kann der Feinwurzelumsatz nur geschätzt werden. ELLENBERG et al. (1986) bestimmten den Feinwurzelumsatz für einen Buchenbestand des Solling durch wiederholte Vorratsaufnahmen und bezifferten diesen mit 1,5 t /ha*a. Die dabei bestimmten Feinwurzelmassen stimmen mit den von RASPE et al. (1999) für den Schluchseestandort ermittelten Werten in der Größenordnung überein. Es erscheint deshalb zulässig die Daten von ELLENBERG et al. (1986) als Schätzgröße in der Bilanz zu verwenden. Die benötigte Wurzelrespiration soll experimentell quantifiziert werden, wobei das Experiment auf dem Vergleich von "durchwurzeltem" und "wurzelfreiem" Boden basiert. Im Idealfall ist die CO₂-Emission aus dem wurzelfreien Boden um den Anteil der Wurzelrespiration und der mikrobiellen Respiration durch Mineralisierung leicht abbaubarer

Feinwurzelstreu reduziert. Die Emissionsdifferenz zwischen den Varianten "durchwurzelt" - "wurzelfrei" entspricht dem C-Eintrag, der zur Energieversorgung der Feinwurzelmasse erforderlich ist und der im Zuge des Feinwurzelumsatzes mineralisiert wird (KELTING et al., 1998).

Leider ist die Durchwurzelung in den Schluchseebeständen weitgehend flächendeckend, so daß die wurzelfreie Variante erst geschaffen werden mußte. Zur Herstellung eines "wurzelfreien" Bodens wurden die Wurzeln durch Eintreiben von Schneidblechen in einem Radius von ca. 1m um die Kammern gekappt. Es ist klar, daß durch diese Maßnahme zunächst eine erhöhte Menge an Nekromasse anfällt, deren Mineralisierung einen temporären Anstieg der CO₂-Emission bewirken kann. Dadurch kann die Emissionsminderung, die aus der fehlenden Wurzel-respiration stammt, teilweise kompensiert werden (vgl. EPRON et al., 1999). Sofern es sich dabei um einen schnell ablaufenden Prozess handelt, müßte die Emissionsdifferenz allerdings kontinuierlich ansteigen und sich auf einem höheren Niveau einstellen.

Eine weitere Schwierigkeit der C-Bilanzierung liegt darin, daß die CO₂-Emission bei Schneelage nicht gemessen werden kann. Die CO₂-Produktion beträgt jedoch im Winter nur ein Bruchteil der sommerlichen Raten. Aus den bisherigen Messungen geht hervor, daß sich die Emission bereits Ende Oktober auf ein konstant niedriges Niveau einpegelt, das vermutlich auch unter Schnee erhalten bleibt. Sofern die Messungen unmittelbar nach der Schneeschmelze begonnen werden, kann das Produktionsniveau erneut festgestellt und es können mittlere Produktionsraten berechnet werden. Eine derartige Extrapolation setzt eine konstante CO₂-Produktion voraus, die bei Schneelage höchstwahrscheinlich auch gegeben ist, da die Bodentemperatur, die die Produktion maßgeblich beeinflusst, bei Schneebedeckung kaum auf Witterungseinflüsse reagiert (Abb. 3).

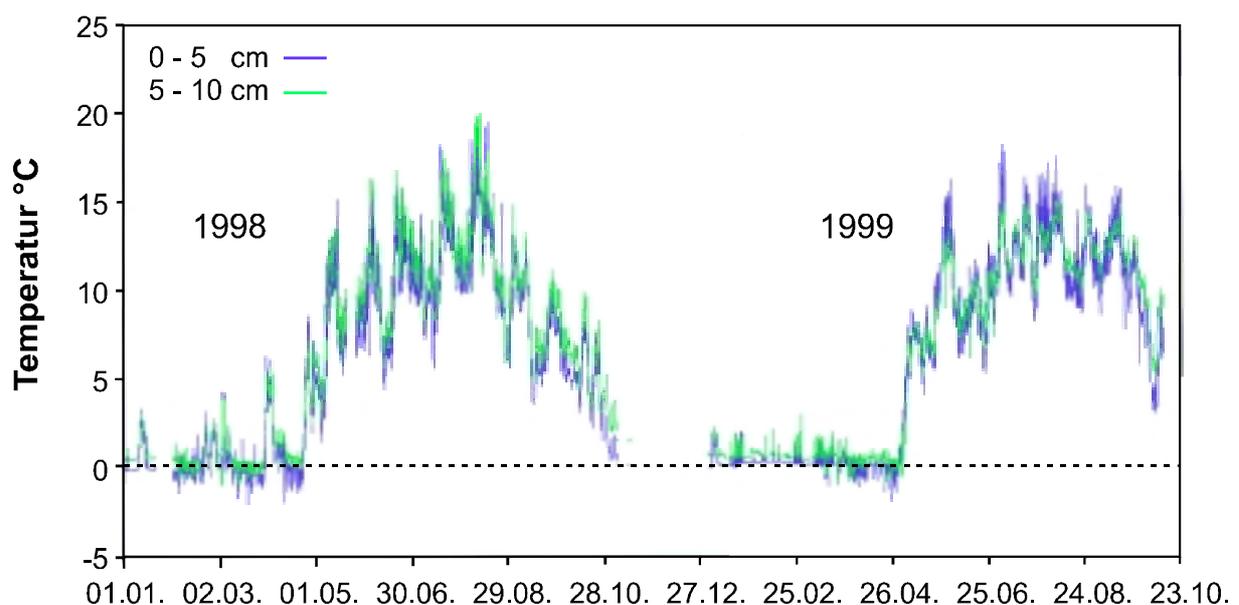


Abbildung 3: Jahresgang der Bodentemperatur (Tiefen: 0-5 cm ; 5-10 cm)

Wurzel- und Humusinventur

Um zu prüfen, ob Zusammenhänge zwischen der CO₂-Emission und dem C-Vorrat des Bodens bzw. der Wurzelbiomasse bestehen, wurde eine Wurzel- und Humusinventur durchgeführt. Nach Abschluß des Wurzelexperiments wurde der Boden unter den einzelnen Kammern bis in eine Tiefe von 60 cm quantitativ abgetragen. Die enthaltenen Wurzeln wurden horizontweise gewonnen und nach Stärkeklassen getrennt gewogen. Parallel dazu wurden die C-Vorräte im Humus bestimmt.

5. Vorarbeiten im ARINUS/FEELING-Projekt

Die Untersuchung zum C-Umsatz im Boden wurde in der Endphase des FEELING-Projektes begonnen und zunächst vom BMFT finanziert. Ziel war es, die Auswirkungen der im Jahr 1990 durchgeführten experimentellen Kalkung auf die biologische Aktivität des Bodens zu erfassen. Als Maß dafür wurde die CO₂-Emission verwendet. Diese wird maßgeblich von der mikrobiellen CO₂-Produktion bestimmt. Die Arbeitshypothese war, daß Kalkung die mikrobielle Aktivität stimuliert. Der dadurch bedingte Anstieg der CO₂-Produktion müßte dann zu einer entsprechend höheren Gesamtemission führen. Um dies zu prüfen, wurde die CO₂-Emission auf der Kalkungs- (S 4) und der Kontrollfläche (S 1) seit 1993 kontinuierlich gemessen.

Während des 3-jährigen Meßzeitraums konnten keine Kalkungseffekte festgestellt werden. Die Ganglinien der Emission waren für Kontroll- und Kalkungsfläche weitgehend kongruent und zeigten keine systematischen Abweichungen (TRÜBY, 1998b). Die berechneten jährlichen Emissionsraten (Tab. 3) variierten zwischen 5.0 und 6.1 t. Dies entspricht etwa dem Mittelwert der aus der Literatur bekannten Respirationsraten (vgl. Übersicht bei SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND, 1998). Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den Solling (BRUMME & BEESE, 1993) hat die Kalkung demnach keine meßbare Änderung der CO₂-Produktion bewirkt. Offensichtlich befindet sich die biologische Aktivität bereits nahe dem Optimum, so daß die Kalkung keine weitere Stimulation bewirken konnte. Indizien dafür sind die hohe Regenwurmaktivität (FEGER, 1993), der Humuszustand und die N-Sättigung des Systems (RASPE et al., 1998).

Trotz der von FEGER (1993) beobachteten verstärkten N-Mineralisierung, ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte C-Mineralisierung bzw. einen substantiellen, durch die Kalkung ausgelösten Humusabbau. Dies deckt sich mit den Befunden von ALDINGER (1987), der

zwar eine Veränderung der Humusform nicht jedoch einen signifikanten C-Verlust feststellte. Durch den Beginn der Messungen 3 Jahre nach der Kalkung bleiben kurzfristige Effekte allerdings unberücksichtigt.

Die CO₂-Emission variierte räumlich und zeitlich stark. Die Variationsbreite reichte von 20-1000 mg CO₂/m²* h. Der Jahresgang der Respiration folgte im wesentlichen dem der Bodentemperatur (TRÜBY, 1996). Dementsprechend fanden sich die höchsten Emissionsraten im Zeitraum August-September. Danach sank die Emission kontinuierlich auf einen Minimalwert ab. Selbst bei stärkerem länger anhaltendem Frost wurde jedoch eine „Rest“-Respiration auf niedrigem Niveau beibehalten (TRÜBY, 1997).

Tabelle 3: Mittlere jährliche CO₂-Emission im Zeitraum 1994-1996 (t C/ha*a)

Fläche	1994	1995	1996	Ø 1994-96
Kontrolle (S 1)	6.1	5.0	5.1	5.4
Kalkung (S 4)	5.6	5.2	5.1	5.3

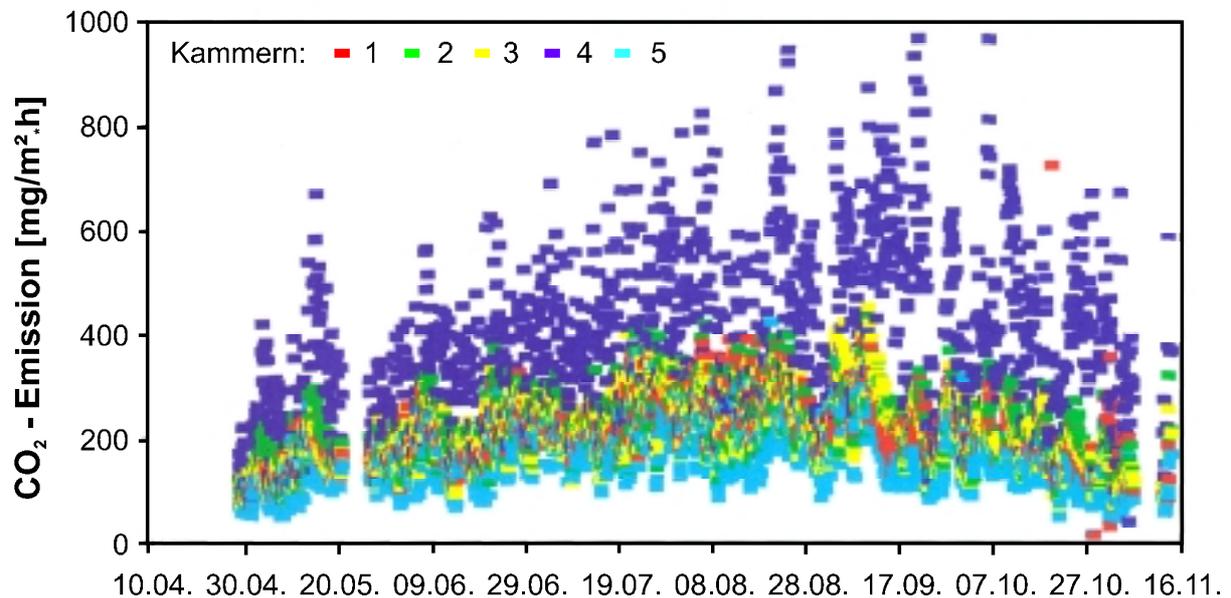
6. Ergebnisse

CO₂-Emission/Bodenrespiration

Abbildung 4 gibt am Beispiel der Fläche S 1/1 eine Übersicht über die laufenden Messungen im Meßjahr 1998. Wie in den vorangegangenen Meßperioden ist die Streuung der Einzelmesswerte groß (TRÜBY, 1996; 1997). Darin enthalten ist die gesamte räumliche und zeitliche Varianz. Dennoch ist der für den Standort charakteristische Jahresgang klar erkennbar. Das Respirationmaximum findet sich im August. Danach sinkt die Respiration auf ein niedriges Niveau ab. Durch den Wintereinbruch Anfang November und die anhaltende Schneelage mußten die laufenden Messungen relativ früh eingestellt werden, so daß der Minimalwert vermutlich noch nicht erreicht ist. Den Messungen im Dezember 1995 zufolge liegt dieser unter 100 mg/m²* h (vgl. TRÜBY, 1996). Eine völlige Einstellung der Respiration konnte auch bei länger anhaltendem Bodenfrost nicht festgestellt werden.

Die mittlere CO₂-Gesamtemission (S 1/2) variierte im Zeitraum 1996-1999 zwischen 21 und 905 mg CO₂/m²*h. Im Hochsommer erreichten Spitzenwerte einzelner Kammern annähernd

1000 mg CO₂/m²* h. Die mittleren monatlichen Emissionsraten (Tab. 5) bewegten sich zwischen 138 und 546 mg CO₂/m²* h.



**Abbildung 4: CO₂-Emission auf der Fläche S 1/1 im Messjahr 1998
(alle Einzelmessungen)**

Eine Übersicht über die räumliche Varianz der CO₂-Emission gibt Tabelle 4. Die Standardabweichung der für die einzelnen Kammern separat berechneten Jahresemission ist relativ klein. Die Variationskoeffizienten sind $\leq 10\%$. Die räumliche Variabilität der CO₂-Emission ist somit im Vergleich mit anderen Bodenparametern gering. Bei fünffacher Feldwiederholung läßt sich die Gesamtemission mit einem Fehler von 3-6 % bestimmen. Wesentlich stärker streuen die Einzelmessungen, wobei maximale Streuungen in den Sommermonaten auftreten (vgl. Abb. 4). Der mittlere prozentuale Standardfehler der Einzelmessung liegt über 20%.

Bei den einzelnen Kammern stellt sich meist ein bestimmtes Emissionsniveau ein. So emittiert beispielsweise Kammer 4 der Fläche S 1/1 stets am meisten CO₂.

Um zu prüfen, ob die Varianz der CO₂-Emission durch Inhomogenitäten in der Humusverteilung zu erklären ist wurden Humusvorrat und CO₂-Emission einander gegenübergestellt (Abb. 5). Ein Zusammenhang ist daran jedoch nicht erkennbar.

Tabelle 4: Räumliche Varianz der CO₂-Emission

	Fläche S 1/2		Fläche S 1/1	
	1997	1998	1997	1998
CO ₂ -Emission (Jahresmittel) [t C/ha*a]	6.8	5.8	4.3	4.2
Standardabweichung [t C/ha*a]	0.53	0.40	0.42	0.31
Variationskoeffizient	8 %	7 %	10 %	7 %
Fehler des Mittelwertes	4 %	3 %	6 %	3 %
Mittlere Standardabweichung (Einzelmessung)	1.4		1.7	
Ø Variationskoeffizient	21 %		25 %	

Der Jahresgang der CO₂-Emission ist für die Meßjahre 1997/98 anhand von Tagesmittelwerten dargestellt (Abb. 6). Die räumliche Variation ist dabei vorab durch Mittelwertbildung eliminiert worden. Der Jahresgang entspricht den früheren Befunden (TRÜBY, 1996; 1997). Die Gesamtemission (S 1/2) ist systematisch höher als die des „wurzelfreien“ Bodens (S 1/1). Dies gilt auch für die nicht dargestellte Meßreihe 1999 (vgl. Tab. 5). Die vorangegangenen lediglich vorläufigen Befunde (TRÜBY, 1997; 1998a) können damit weiter erhärtet werden. Die Ganglinien sind für beide Flächen oft bis ins Detail kongruent. Trotz unabhängig voneinander arbeitender Meßsysteme stimmen selbst kleinste Emissionsschwankungen zeitlich überein.

Die höhere zeitliche Auflösung der Jahresgänge zeigt für einzelne Zeitabschnitte periodisch wiederkehrende Tagesgänge, die exakt dem Gang der Bodentemperatur folgen (Abb.7). Die CO₂-Emission ist demnach zeitweise streng temperaturkontrolliert. Andererseits finden sich auch Zeitabschnitte in denen kein Tagesgang und/oder keine Parallelität zwischen Temperatur und Emissionsganglinien erkennbar ist. Die Überprüfung, ob dies in Zusammenhang zum Bodenwassergehalt, der Niederschlagsverteilung oder dem Auftreten von Starkniederschlägen steht, führte zu keinem Ergebnis.

Einen Überblick über die Ergebnisse des Wurzelexperiments geben die mittleren monatlichen Emissionsraten in Tabelle 5. Die Vorlaufphase im Jahr 1996 zeigt, daß die Emission aus der

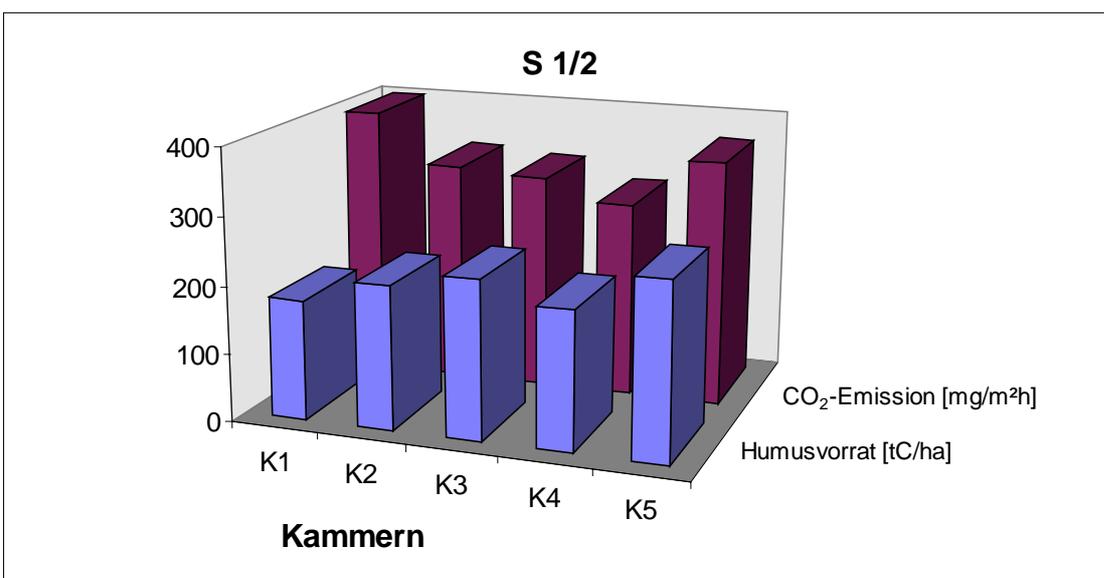
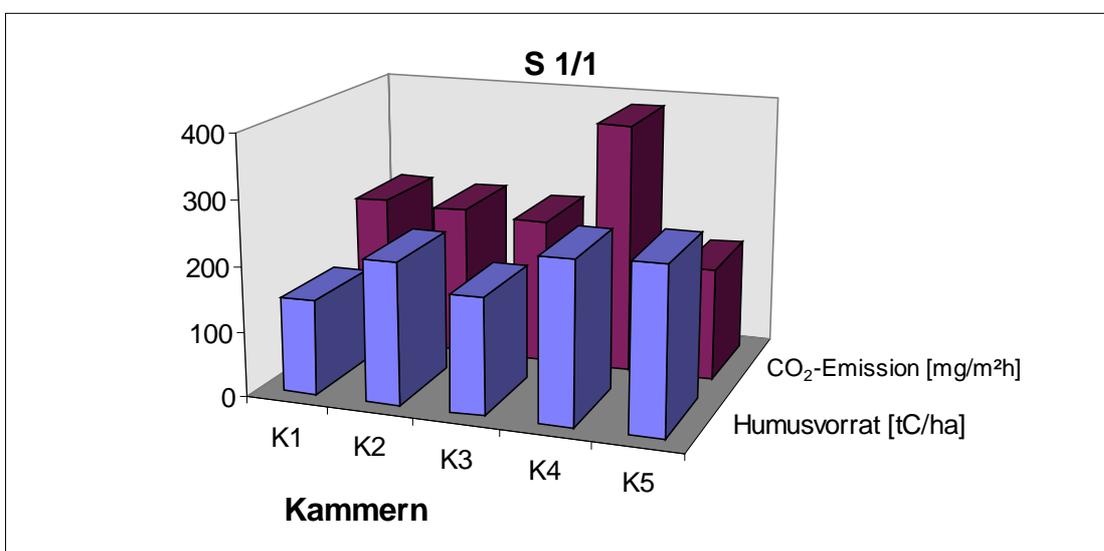
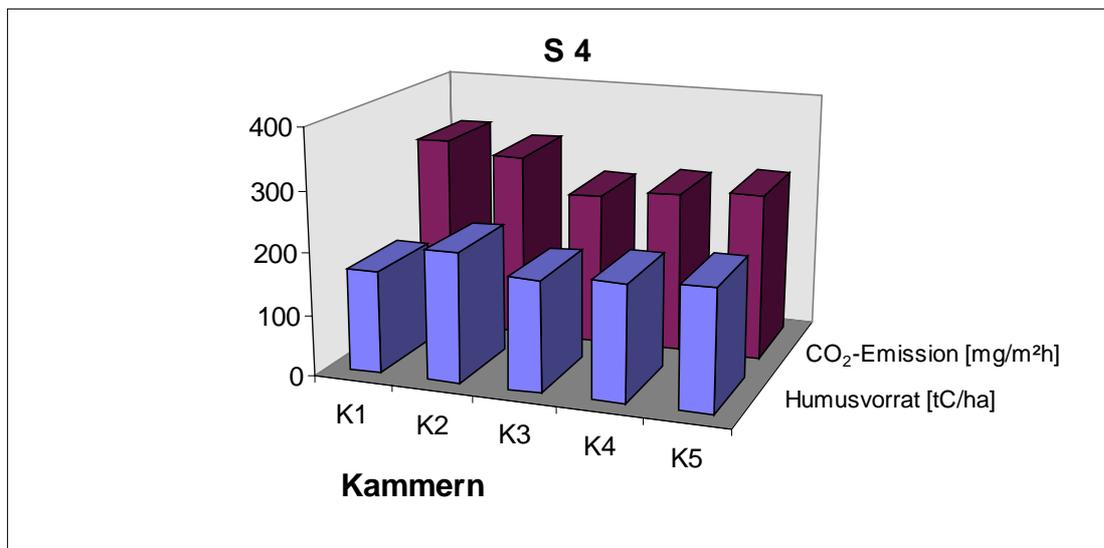


Abbildung 5: Beziehung zwischen den mittleren jährlichen CO₂-Emission und dem Humusvorrat des Bodens.

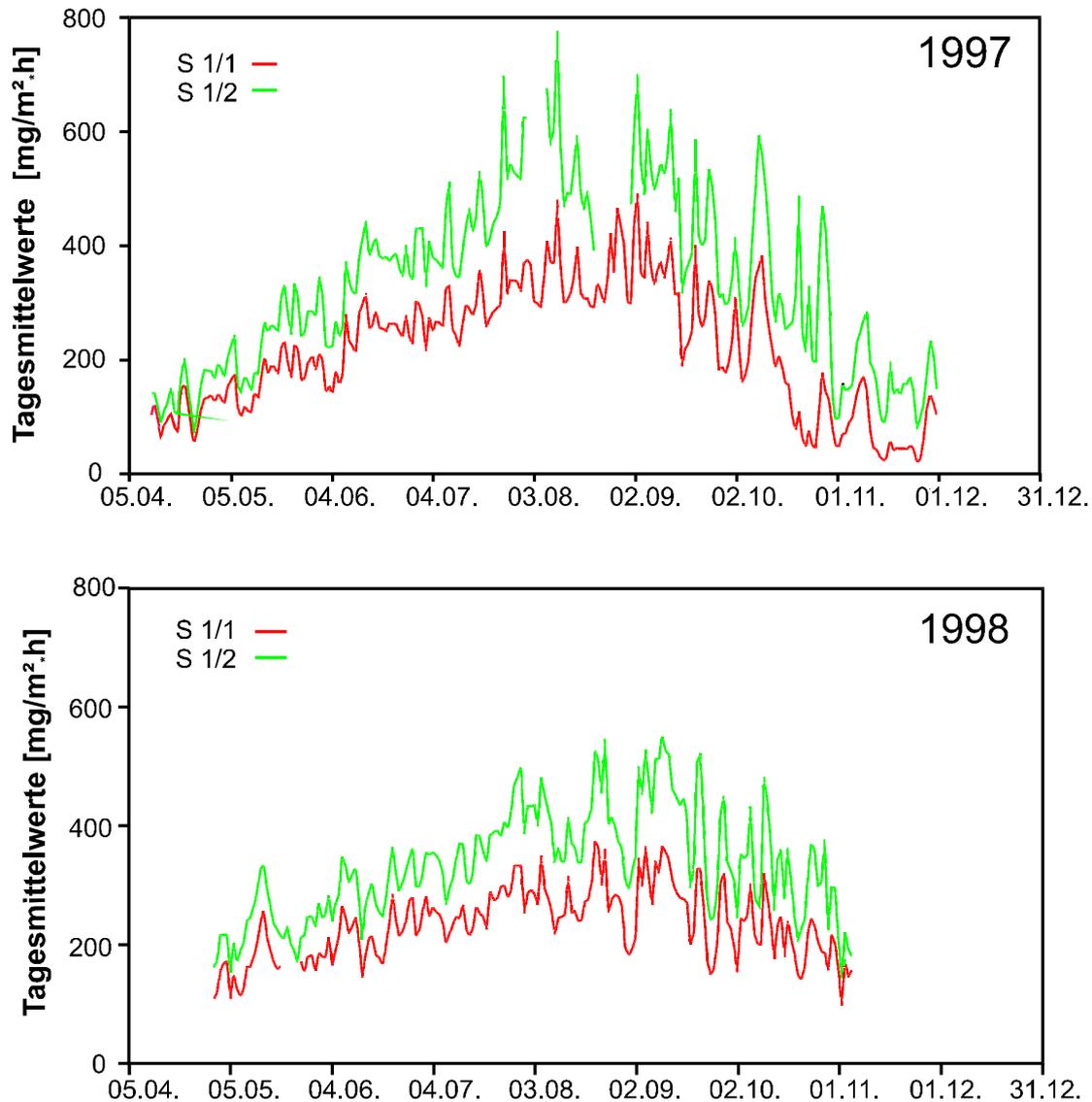


Abbildung 6: Jahressgang der CO₂ - Emission auf den Flächen S 1/1 und S 1/2

In den Monaten Mai/Juni waren die Unterschiede zunächst relativ klein. Mit der Abdichtung des Systems durch seitlich angebrachte Gummimanschetten erhöhte sich die Differenz deutlich. Bereits vor Beginn des Versuches lieferte die Variante (S 1/2) im Mittel um durchschnittlich 14% höhere Werte. Ein weiterer Anstieg der Differenz um 11% folgte nach der Wurzelkappung Ende Oktober.

In den Jahren 1997-1999 variiert die Emissionsdifferenz zwischen 17% und 55% der Gesamtemission. Die Wurzelkappung bewirkte somit eine systematische Reduktion der Bodenrespiration in einer Größenordnung von durchschnittlich 30%. Von der Meßkampagne 1999 sind nur die Daten für den Zeitraum Mai bis Juli vergleichbar. Danach wurden die vor Beginn des Experiments angebrachten Abdichtungen wieder entfernt, um den anfänglich beo-

bachteten Effekt nochmals zu überprüfen. Erwartungsgemäß führte dies wieder zu einer deutlichen Reduzierung der Differenz.

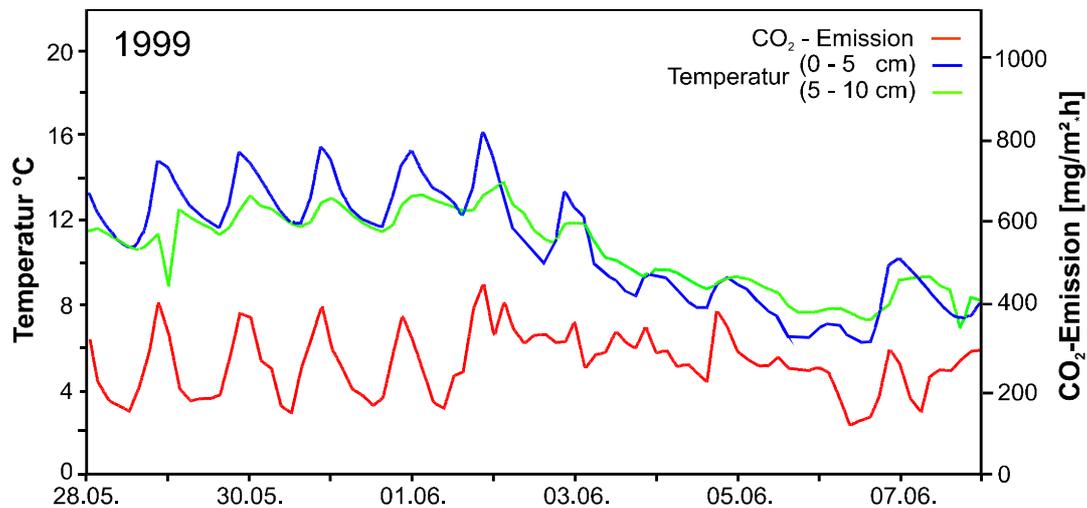


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen CO₂ - Emission und Bodentemperatur

C-Bilanz

Die C-Bilanz des Bodens (Tab. 6) enthält alle wesentlichen Umsatzkomponenten. Der C-Eintrag wurde aus dem Streufall, dem Wurzelzuwachs, dem geschätzten Feinwurzelumsatz und der Wurzelrespiration berechnet.

Die Streu trägt mit etwa einem Drittel zum gesamten C-Eintrag in den Boden bei. Wegen der großen zeitlichen Varianz und der zeitlichen Entkoppelung von den Ab- und Umbauprozessen wurden hierfür Durchschnittsraten der letzten 10 Jahre verwendet. Die C-Akkumulation durch den Wurzelmassenzuwachs spielt im Vergleich mit den anderen Eintragskomponenten eine geringe Rolle. Die jährlichen Raten wurden als Mittelwert aus der von RASPE (1992) erhobenen Wurzelmasse errechnet, wobei ein konstanter Zuwachs unterstellt wurde.

Der C-Eintrag, der für Wurzelrespiration und Feinwurzelmineralisierung unmittelbar wieder umgesetzt wird, ist die Haupteintragskomponente. Hinzu kommt der Beitrag durch die Feinwurzelstreu, die durch den laufenden Wurzelumsatz anfällt. Dieser wurde auf der Grundlage von Wurzelerhebungen durch ELLENBERG et al. (1986) und RASPE et al. (1999) auf 0.8 t C / ha*a eingeschätzt.

Die CO₂-Emission ist die maßgebliche Austragskomponente der C-Bilanz des Bodens. Die C-Austräge durch DOC und HCO₃ sind vernachlässigbar gering (ARMBRUSTER, 1998). Der C-Austrag ist für beide Meßjahre deutlich höher als der Eintrag. Die Bilanz des Bodens ist

somit negativ, gleichbedeutend mit einem Abbau des Humusvorrates im Boden. Die ermittelten Vorratsänderungen sind $> 1 \text{ t/ha*a}$ und liegen deutlich außerhalb des Fehlerrahmens.

Tabelle 6: C-Bilanz des Bodens 1997/98 [t C / ha*a]		
	1997	1998
Eintrag		
Streufall Ø 1987-96 (ARMBRUSTER, mdl. Mitt.)	1.5 ± 0.4	
Wurzelzuwachs (berechnet nach RASPE, 1992)	0.4 ± 0.2*	
Feinwurzelumsatz + Wurzelrespiration berechnet als $\Delta (S_{1/2} - S_{1/1})$	2.2 ± 0.3	1.6 ± 0.2
Feinwurzelumsatz (geschätzt nach ELLENBERG et al., 1986 und RASPE et al., 1999)	0.8	0.8
Σ Eintrag	4.9 ± 0.5	4.3 ± 0.5
Austrag		
CO ₂ -Gesamt-Emission (S 1/2)	6.5 ± 0.2	5.8 ± 0.2
DOC (ARMBRUSTER, 1998)		<0.1
HCO ₃ (ARMBRUSTER, 1998)		<0.1
Σ Austrag	6.5 ± 0.2	5.8 ± 0.2
Vorratsänderung	1.6 ± 0.6	1.5 ± 0.5
CO ₂ -Emission „wurzelfrei“ (S 1/1)	4.3 ± 0.2	4.2 ± 0.2
* = geschätzter Fehler		

Humus- und Wurzelinventur

Die Humusvorräte der einzelnen Versuchplots variieren um 210 t C /ha (Tab. 7). Die absoluten Mengen liegen damit etwas über den von FEGGER (1993) für die Fläche S 1 bestimmten Werten. Die relativen Abweichungen vom Mittelwert zwischen Kalkungs- und Kontrollfläche betragen etwa 10%. Die Vorräte der Teilplots S 1/1 und S 1/2 sind annähernd gleich. Die Abweichung ist < 1%. Systematische, das Wurzelexperiment möglicherweise störende Vorratsunterschiede bestehen demnach nicht. Die Vorräte der einzelnen Kammern variieren hingegen erheblich.

Tabelle 7: Ergebnis der C-Inventur [t C / ha]						
Kammer Nr.	1	2	3	4	5	Ø 1-5
Fläche S 4						
Wurzeln						
< 2 mm	0.54	1.38	0.31	0.45	1.24	0.78
2 - 10 mm	1.3	1.7	1.5	1.2	2.8	1.7
>10 mm	3.7	6.6	4.6	2.9	5.9	4.7
Humus	172	218	186	192	203	195 ±18
Fläche S 1/1						
Wurzeln						
< 2 mm	0.45	0.53	0.23	1.02	0.35	0.52
2 - 10 mm	1.4	3.2	1.9	1.1	0.45	1.6
>10 mm	0	5.9	0.9	0	0	1.4
Humus	152	223	188	261	285	222 ±53
Fläche S 1/2						
Wurzeln						
< 2 mm	1.3	1.4	1.7	1.4	1.7	1.5
2 - 10 mm	2.2	1.3	2.1	2.0	1.6	1.9
>10 mm	2.7	1.4	0.6	2.6	0.2	1.5
Humus	181	214	238	209	261	220 ±30

Die C-Vorräte in der Wurzelbiomasse sind im Vergleich zum Humusvorrat gering. Für die Variante S 1/2 (normal durchwurzelt) beträgt der mittlere Vorrat 4.9 t C /ha, entsprechend 2.3 % des gesamten C-Vorrates im Boden. Die ermittelten C-Vorräte sind allerdings nicht flächenrepräsentativ, da die Kammern stets in mindestens einem Meter Entfernung von

nächstgelegenen Stammfuß installiert wurden. Der Anteil der Wurzeln > 10 mm ist deshalb systematisch zu niedrig bestimmt worden. Dies erklärt die Abweichung von den von RASPE (1992) ermittelten Werten. Danach beträgt der in den Wurzeln festgelegte C-Vorrat ca. 19.5 t/ha.

Der mittlere C-Vorrat der Feinwurzeln variiert zwischen 0.5 t/ha und 1.5 t/ha. Die Wurzelkappung hat auf den Teilflächen S 1/1 und S 4 eine deutliche Reduzierung der Wurzelmasse bewirkt. Die Unterscheidung, ob es sich dabei um vitale Feinwurzeln oder gut erhaltene Nekromasse handelt war allerdings schwierig. Berücksichtigt man jedoch, daß die Wurzeln in ca. einem Meter Abstand von den Kammern gekappt worden und aus stärkeren Wurzeln etwa 5 cm lange Verbindungsstücke herausgesägt wurden, so ist ein Einwachsen neuer Wurzeln unwahrscheinlich. Es wird deshalb davon ausgegangen, daß es sich bei den Feinwurzeln überwiegend um gut erhaltene Nekromasse handelt. Unterstellt man ursprünglich gleiche Vorräte für die Flächen S 1/1 und S 1/2, so wären $2/3$ der durch die Wurzelkappung erzeugten Nekromasse humifiziert bzw. mineralisiert.

7. Diskussion

Methodische Fehler

Die Messung von Stoffflüssen ist stets mit unerwünschten Veränderungen der natürlichen Prozessabläufe verbunden. Dies gilt noch mehr für experimentelle Eingriffe mit denen Prozesse gezielt beeinflusst werden sollen. Die Meßergebnisse sind deshalb mit methodisch bedingten Fehlern behaftet. Im folgenden werden einzelne Fehlerquellen diskutiert und bewertet. Um den Gasaustausch mit der Aussenluft zu unterbinden, wurden die auf die Bodenoberfläche aufgesetzten Kammern der Fläche S 1/2 mit Gummimanschetten seitlich abgedichtet. Diese bewirkten jedoch neben der gewünschten Reduzierung des seitlichen Gasaustausches auch eine Behinderung des vertikalen Gasaustausches, die mit einer Vergrößerung der Kammerfläche gleichzusetzen ist. Die dadurch bedingte erhöhte Emissionsrate täuscht einen Versuchseffekt vor. Anhand der Vorlaufphase zum Wurzelexperiment kann jedoch der Fehler eingeschätzt werden. Nach der Installation der Kammern im April 1996 wurde 2 Monate lang ohne seitliche Abdichtung gemessen. Während dieser Zeit waren die Emissionsraten gegenüber der Variante S 1/1 nicht erhöht. Nach dem Anbringen der Gummimanschetten stellten sich deutlich erhöhte Emissionsraten ein. Die Emissionsdifferenz zwischen beiden Varianten betrug danach etwa 14% der Gesamtemission. Diese resultiert aus der Abdichtung des Systems, der indirekt vergrößerten Kammerfläche und der bei der Installation der Fläche S 1/1 teilweise

vollzogenen Wurzelkappung (vgl. Tab. 2). Die Wurzelrespiration war deshalb schon vor der im Oktober 1996 durchgeführten vollständigen Wurzelkappung reduziert. Diese erhöhte die Differenz dann nochmals deutlich (Tab. 5). Das Experiment als solches zeigt somit klare Effekte.

Als Konsequenz ergibt sich, daß die Gesamtemission bzw. der Beitrag der Wurzelrespiration und der Feinwurzelmineralisierung zu hoch bestimmt wurde. Die in der C-Bilanz verwendete Gesamtemission ist daher mit einem systematischen Fehler behaftet, der die Ein- und Austragsraten gleichermaßen belastet. Die berechnete Vorratsänderung im Boden ändert sich dadurch nicht.

Unsicherheiten der C-Bilanz

Die ermittelte C-Vorratsänderung liegt deutlich außerhalb des Bereiches des zufälligen Fehlers. Selbst bei Verdoppelung der zufälligen Fehler bleiben die Bilanzen negativ.

Die größte Unsicherheit der Bilanz liegt in der Einschätzung des Feinwurzelumsatzes. ELLENBERG et al. (1986) berechnen aus wiederholten Vorratsinventuren den minimalen Feinwurzelumsatz für einen ca. 120-jährigen Buchenbestand des Solling. Der durchschnittliche Wurzelmassenzuwachs liegt für diesen Bestand jedoch deutlich höher als für unseren Fichtenbestand am Schluchsee. Bei dem in der Bilanz verwendeten Feinwurzelumsatz von ca. 0.8 t C / ha*a dürfte es sich deshalb eher um einen Maximalwert handeln.

Nicht einschätzbar sind auch methodische Fehler des Wurzelexperiments, die zu systematischen Verfälschungen führen können. Die Bilanz kann daher lediglich auf der Grundlage von Literaturdaten auf ihre Plausibilität überprüft werden. EPRON et al. (1999) führten ein ähnliches Experiment in einem Buchenbestand durch. Die CO₂-Emission der wurzelfreien Variante betrug dabei etwa 2/3 der Gesamtemission. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch BOWDEN et al. (1993). Der aus der Wurzelrespiration stammende Beitrag zur Gesamtemission bewegt sich damit in derselben Größenordnung wie bei unserem Experiment. EPRON et al. (1999) gehen jedoch davon aus, daß etwa die Hälfte der tatsächlichen Wurzelrespiration durch die Mineralisierung zusätzlich erzeugter Nekromasse kompensiert wird und korrigieren den Anteil der Wurzelrespiration auf 60% der Gesamtemission. Eine C-Bilanzierung auf dieser Grundlage würde für den Standort Schluchsee zu einer annähernd ausgeglichenen Bilanz führen. Allerdings sind diese Annahmen für unser Experiment ziemlich unrealistisch, denn der Gesamtvorrat an Feinwurzeln beträgt lediglich 1.5 t C / ha (vgl. Tab. 7). Selbst wenn diese innerhalb des ersten Jahres rückstandsfrei mineralisiert würden, ergäbe sich höchstens eine

ausgeglichene Bilanz. Außerdem müssten die Emissionsdifferenzen zwischen beiden Varianten danach deutlich ansteigen (KELTING et al., 1998), was innerhalb des 3-jährigen Meßzeitraumes nicht der Fall ist.

Eine rechnerische Korrektur der Wurzelrespiration nach dem Vorbild von EPRON et al. (1999) wäre auf der Grundlage unserer C-Inventur (Tab. 7) ebenfalls möglich. Danach hätte die Nekromasse innerhalb von 3 bzw. 5 Jahren um ca. 1 t abgenommen. Der Anteil der Wurzelrespiration an der Gesamtemission würde sich dadurch um durchschnittlich 0.3 t C /ha*a erhöhen, die C-Vorratsänderung im Boden entsprechend reduzieren. Eine derartige Berechnung setzt jedoch eine exakte Quantifizierung der Feinwurzelmasse voraus, was angesichts der Heterogenität der Wurzelverteilung kaum möglich ist.

Einen weiteren Beitrag zur Quantifizierung des C-Eintrages liefern KELTING et al. (1998), die zwischen der Wurzelrespiration, der Rhizosphärenrespiration und der Respiration des wurzelfreien Bodens unterscheiden. Den Anteil der Wurzelrespiration bezifferten sie mit 32% der Gesamtrespiration. Hinzu kamen weitere 20% aus dem Abbau leicht zersetzbarer Wurzelstreu, die für unsere Bilanz mit durchschnittlich 13% eingeschätzt wurde. Nach KELTING et al. (1998) wären 52% der Gesamtemission dem Eintrag zuzuordnen. Bei unserer Bilanz sind es 43%. Auch im Hinblick darauf erscheint die Bilanz realistisch.

Die Fehleranalyse macht deutlich, daß die Bilanz mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Selbst bei Unterstellung maximaler Fehler bei den Eintragsgrößen ergibt sich jedoch stets eine negative Vorratsänderung. Es erscheint daher sicher, daß derzeit ein Humusvorratsabbau erfolgt. Unsicherer ist dagegen der berechnete Absolutbetrag der Vorratsänderung, der mit relativen Fehlern von bis zu 80% behaftet sein kann. Die Absolutwerte haben damit lediglich die Qualität einer Schätzung.

Ursachen für die negative Bilanz

Bestandesumwandlung

FEGER (1993) berichtet von einer verstärkten N-Mineralisierung im Unterboden. Er erklärt dies mit einem Abbau reliktscher Humusvorräte, durch die Umwandlung von Buchen- in Fichtenbestände. Diese führt zu einer Verflachung des Wurzelwerks, wodurch die im Unterboden anfallende Menge an Wurzelstreu stark zurückgeht und die Humusvorräte dort allmählich mineralisiert werden. Eine Erhöhung der Emissionsraten tritt jedoch nur ein, wenn sich Wurzelmasse und Feinwurzelumsatz des Fichtenbestandes auf einem niedrigeren Niveau einstellen. Dazu liegen für den Standort Schluchsee keine Daten vor.

Bestandesentwicklung und Wachstumsdynamik

Denkbar ist auch, daß die C-Dynamik im Boden maßgeblich von der Bestandesentwicklung und der Wachstumsdynamik bestimmt wird. Die Ernte der Vorbestände im Kahlschlagverfahren hat möglicherweise einen Mineralisierungsschub mit einer entsprechend erhöhten CO₂-Emission ausgelöst. Es ist bekannt, daß die CO₂-Emission aus dem Boden von Bestandeslücken stets erhöht ist (SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND, 1998; BRUMME & BEESE, 1993). Zudem fehlt der Eintrag durch die Laub- bzw. Nadelstreu vollständig. Die C-Bilanz ist in dieser Phase negativ. Im anschließenden Kulturstadium steigt die Streuproduktion an. Gleichzeitig sinkt die Wärmezufuhr auf den Boden, was zumindest in den Hochlagen des Schwarzwaldes eine verringerte biologische Aktivität zur Folge haben dürfte. In dieser Bestandesphase wird Kohlenstoff wahrscheinlich verstärkt akkumuliert. Die später folgenden Durchforstungen führen anfänglich erneut zu einer verringerten Streuproduktion. Gleichzeitig steigt die Wärmezufuhr auf den Boden. Die biologische Aktivität wird stimuliert, was eine ausgeglichene oder negative Bilanz zur Folge haben könnte. Wenngleich Durchforstungsmaßnahmen im Bereich der Messflächen länger zurückliegen, so haben Schneebrüche eine erhebliche Auflichtung bewirkt und die Abbauprozesse möglicherweise beschleunigt. Die derzeit negative C-Bilanz könnte demnach Folge einer von der Bestandesentwicklung bestimmten natürlichen C-Dynamik sein.

Atmogene N-Einträge

Bedingt durch die atmogene Deposition hat sich die N-Versorgung von Waldbeständen des Schwarzwaldes in den letzten Jahrzehnten erheblich verbessert. FEGER (1993) ermittelte für den Standort Schluchsee einen mittleren N-Eintrag von ca. 12 kg/ha*a und stellte eine N-Sättigung des Ökosystems fest. Er berichtet weiterhin von einem Wandel der Humusform zugunsten von Moder- und Mullhumus. Gleichzeitig verengen sich die C/N-Verhältnisse ohne daß damit ein N-Verlust einhergeht. Dies ist nur durch einen Verlust an Kohlenstoff zu erklären.

Ökologische Bewertung

Eine negative C-Bilanz bedeutet nicht zwangsläufig eine Verschlechterung der Standortqualität. Sofern die C-Dynamik des Bodens an die Bestandesentwicklung und den Wachstumszyklus der Bestände gekoppelt ist, handelt es sich um eine natürliche Fluktuation der C-

Vorräte und die C-Verluste haben keine nachhaltigen Auswirkungen auf die Standortsqualität. Eher günstig zu bewerten ist der C-Verlust im Hinblick auf die beobachtete Verengung der C/N-Verhältnisse. Damit verbunden ist meist eine Veränderung der Humusqualität zu Gunsten höher molekularer Huminstoffe. Ist der C-Verlust hingegen Folge der von FEGGER (1993) vermuteten Mineralisierung „reliktischer“ Humusvorräte, so indiziert dies einen Verlust an Retentionsvermögen gegenüber essentiellen Nährstoffen. Dies ist mit einer Verschlechterung der Standortsqualität gleichzusetzen. Die ermittelten Vorratsänderungen sind mit großen Unschärfen behaftet. Es ist davon auszugehen, daß es sich dabei eher um Maximalwerte handelt. Die Bilanz gibt somit keinen Hinweis auf einen substantiellen, sich auf die Standortsqualität nachhaltig auswirkenden Humusvorratsabbau.

Danksagung

An der Durchführung des Projektes, insbesondere an dem oft strapaziösen Meßbetrieb im Gelände waren Frau Friederike Schreiber und Frau Sabine Gleichauf maßgeblich beteiligt. Dafür danke ich ihnen herzlich. Herrn Dipl. Phys. Dr. H.-J. Garthe danke ich für die Entwicklung der Meßanlagen und die Programmierarbeiten. Weiterer Dank gilt dem BMFT und dem Land Baden Württemberg für die finanzielle Förderung. Ohne die Überbrückung einer einjährigen Finanzierungslücke durch eine Zuwendung der Fa. Schwermetall / Stolberg hätten die Messungen im Jahr 1995 eingestellt werden müssen. Für die großzügige Spende bedanke ich mich bei Herrn Dipl. Ing. E. Nosch.

Literatur

ALDINGER, E. (1987): Elementgehalte im Boden und in den Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände im Buntsandstein-Schwarzwald. Freiburger Bodenkundl. Abh. **19**, 267 S.

ARMBRUSTER, M. (1998): zeitliche Dynamik der Wasser- und Elementflüsse in Waldökosystemen. Zeitreihenanalysen, Simulationsmöglichkeiten und Reaktion auf experimentell veränderte Stoffeinträge in den ARINUS-Wassereinzugsgebieten. Freiburger Bodenk. Abh. **38**, 301 S.

BAUM, U. (1979): Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf die Nährelementvorräte im Boden eines streugenutzten Oberpfälzer Kiefernbestandes. Forstw. Cbl. **98**, 245-248.

BRUMME, R. und BEESE, F. (1993): Effects of Liming and Nitrogen Fertilization on Emissions of CO₂ and N₂O from a Temperate Forest. J. Geophys. Res. **97**, 12851-12858.

BRUMME, R. (1995): Mechanisms of carbon and nutrient release and retention in beech forest gaps. III Environmental regulation of soil respiration and nitrous oxide emissions along a microclimatic gradient. Plant & Soil **169**, 593-600.

BOWDEN, A.D., K.J. NADELHOFFER, R.D. BOONE, J.M. MELILLO and J.B. GARRISON (1993): Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Can. J. For. Res. **23** 7, 1402-1407.

ELLENBERG, H., R. MAYER & J.SCHAUERMANN (1986): Ökosystemforschung - Ergebnisse des Solingprojekts. Ulmer Stuttgart.

EPRON, D., L. FARQUE, E. LUCOT & P.M. BADOT (1999): Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. Annals of Forest Science **56** 4, 289-295.

FEGER, K.H. (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. Freiburger Bodenkundl. Abh. **31**, 237 S.

GERBOTH, C. (1998): Änderung von Humusformen im nördlichen Oberschwaben. Freiburger Forstliche Forschung **3**, 163 S.

HÜTTL, R. (1985): „Neuartige“ Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen (*Picea abies* KARST.) in Südwestdeutschland. Freiburger Bodenkundl. Abh. **16**, 195 S.

HÜTTL, R. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Freiburger Bodenk. Abh. **28**, 440 S.

KELTING, D. L., J.A. BURGER & G.S. EDWARDS (1998): Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere and the root-free soil respiration in forest soils. Soil Biology and Biochemistry **30** 7, 961-968.

KIRA, T., H. OWAGA, K. YODA & K. OGINO (1964): Primary production by a tropical rain forest of southern Thailand. Bot. Magazine, Tokyo, **77**, 428-429.

KREUTZER, K. & A. GÖTTLEIN (Hrsg. 1991): Ökosystemforschung Höglwald. Parey Hamburg-Berlin 261 S.

LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. Ulmer Stuttgart 5.Aufl. 394 S.

LARIONOVA, A.A., A.M. YERMOLAYEV, S.A. BLAGODADTSKY; L.N. ROZANOVA, I.V. YEVDOKIMOV & D.B. ORLINSKY (1998): Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. Biol. Fertil. Soils **27**, 251-257.

MAR-MÖLLER, C., D. MÜLLER & J. NIELSEN (1954): Graphic presentation of dry matter production of European beech. Forstl. ForsØgsv. i. Danmark, **21**, 327-335.

- MATZNER, E. (1985): Einfluß von Düngung und Kalkung auf den Elementumsatz und die Elementverteilung in zwei Waldökosystemen im Solling. *AFZ* **41**, 1143-1147.
- MATZNER, E. (1987): Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. Habilitationsschrift Univ.- Göttingen.
- MILLER, R.E. (1964): Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen zur Verbesserung von der Humusform auf den Humus- und Stickstoffvorrat von Waldböden. Diss. Hann. Münden
- MÜHLHÄUSER, G. (1980): Die Bodenvegetation als Hilfe zur Standortsansprache in künstlichen Nadelwäldern am Beispiel der Standortkartierung im nördlichen Oberschwaben. *Forst- und Holzwirt* **1**, 6-8.
- RASPE, S. (1992): Biomasse und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) des Südschwarzwaldes und Veränderungen nach Düngung. *Freiburger Bodenkundl. Abh.* **29**, 197 S.
- RASPE, S., K.H. FEGER & H.W. ZÖTTL (1998): Ökosystemforschung im Schwarzwald. Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern. *ECOMED Landsberg* 533 S.
- RASPE, S., K.H. FEGER, M. ARMBRUSTER & K. LORENZ (1999): Einfluß von Oberbodenaustrocknung und Kalkung auf Wachstum und Umsatz von Fichtenfeinwurzeln. *Mit. Dtsch. Bodenk. Ges.* **91** **2**, S. 847-850.
- SCHACK-KIRCHNER, H. & E.E. HILDEBRAND (1998): Prozessmonitoring mit Gaskonzentrationsmessungen in Waldböden. In HILDEBRAND E.E. & SCHACK-KIRCHNER (Hrsg.): *Der Gashaushalt von Waldböden: Messung, Modellierung und ökologische Bedeutung*. *Freiburger Bodenkundl. Abh.* **37**, 9-149.
- SCHNEIDER, S. H. (1989): *Climatic Change*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston London, 337 S.
- SEIBT, G., W. WITTICH & J.B. REEMTSMA (1977): Ertragskundliche und bodenkundliche Ergebnisse langfristiger Kalkdüngungsversuche im nord- und westdeutschen Bergland. *Schriftenr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen* **50**, 298 S.
- THIERRON, V. & H. LAUDELOUT (1996): Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest. *Can J. For. Res.* **26** **7**, 1142-1148.
- TRÜBY, P. (1996): CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee: I. Ziel - methodischer Ansatz - Ergebnisse. *FZKA PEF-Berichte* **142**, 45-58.
- TRÜBY, P. (1997): CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee: II. Ein Experiment zur Einschätzung der Wurzelrespiration und des Feinwurzelumsatzes. *FZKA PEF-Berichte* **153**, 31-42.
- TRÜBY, P. (1998a): CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee: III. Ergebnisse des Wurzelexperiments, C-Bilanz und Effekte einer experimentellen Kalkung. <http://bwplus.fzk.de>
- TRÜBY, P. (1998b): CO₂-Emission und C-Umsatz im Boden des Standorts Schluchsee. In RASPE, S.; FEGER, K.H. und ZÖTTL, H.W. (Hrsg.): *Ökosystemforschung im Schwarzwald. Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern*. *Verbundprojekt ARINUS. Umweltforschung in Baden-Württemberg, ecomed-Verlag Landsberg*; S. 250-259.
- ULRICH, B., R. MAYER & P.K. KHANNA (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und Ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schr. Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen u. d. Nieders. FVA*, 291 S.
- ULRICH, B. & W. KEUFFEL (1970): Auswirkungen einer Bestandeskalkung zu Fichte auf den Nährstoffhaushalt des Bodens. *Untersuchungen an Kalkungsversuchen im Forstamt Eschrode. Arch. Forstw.* **41**, 30-35.
- UCHIDA, M., T. NAKATSUBO, T. HORIKOSHI & K. NAKANE (1998): Contribution of micro-organisms to the carbon dynamics in black spruce (*Picea mariana*) forest soil in Canada. *Ecological Research* **13**, 17-26.

VOGT, K. (1991): Carbon budgets of temperate forest ecosystems. *Tree Physiol.* **9**, 69-86.

YODA, K. (1967): Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. III. Community respiration. *Nature and Life in Southeast Asia.* **5**, 83-148.