

## Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen

# Kohlenstoffumsatz in Waldökosystemen und deren Böden

Von K. J. Meiwes, F.-W. Badeck, F. Beese, D. Berthold, P. Einert, H. Jochheim, R. Kallweit, A. Konopatzky, P. Lasch, H. Meesenburg, M. Puhmann, S. Raspe, H. Schulte-Bisping, C. Schulz, F. Suckow

*Wälder spielen im globalen Kohlenstoffkreislauf eine bedeutende Rolle, nehmen sie doch ein Drittel der Landfläche ein und speichern in der Biomasse und in den Böden erhebliche Kohlenstoffmengen. Die Berichterstattung zu den mit dem Kyoto-Protokoll eingegangenen Verpflichtungen erfordert die Quantifizierung von Größen des Kohlenstoffhaushaltes der Wälder, die mit den standardmäßig zur Verfügung stehenden Inventurmethode nicht auf kurzen Zeitskalen erfasst werden. Dies betrifft insbesondere die Dynamik der Holzvorräte (ober- und unterirdisch) sowie der Kohlenstoffvorräte in Auflagehumus und Mineralboden sowie im Totholz.*

Die Vielfalt der Böden und die kleinräumige Variabilität der Kohlenstoffgehalte, Lagerungsdichten und Skelettgehalte sowie deren Tiefenprofile macht eine Abschätzung der jährlichen Änderungen der C-Vorräte in Böden aufgrund von Inventurvergleichen unmöglich. Der dazu erforderliche Messaufwand würde die verfügbaren Mittel bei weitem übersteigen.

Für die Fortschreibung der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Bestand und im Boden können Simulationsmodelle genutzt werden, die sowohl bei der nationalen Berichterstattung wie auch bei der Erstellung regionaler Berichte eingesetzt werden.

Diese Modelle können anhand von Daten des Forstlichen Umweltmonitorings kalibriert und validiert werden. Das Level-II-Programm bietet die geeignete Kombination aus detaillierter Information und standörtlicher Repräsentanz für diesen Zweck.

Karl J. Meiwes und Hennig Meesenburg sind Mitarbeiter der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen. Franz-W. Badeck, Petra Lasch und Felicitä Suckow sind Mitarbeiter des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. Friedrich Beese, Dirk Berthold und Hubert Schulte-Bisping sind Mitarbeiter des Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen. Peter Einert, Reinhard Kallweit und Alexander Konopatzky sind Mitarbeiter der Landesforstanstalt Eberswalde. Hubert Jochheim und Martina Puhmann sind Mitarbeiter des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg. Stephan Raspe und Christoph Schulz sind Mitarbeiter der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Weihenstephan. Die Untersuchungen wurden mit Mitteln der EU (Forest Focus) und der Länder Bayern, Brandenburg und Niedersachsen durchgeführt.

### Ziele

Ziel des Vorhabens war es, an einem repräsentativen Kollektiv von Waldökosystemen in den drei Bundesländern Bayern, Brandenburg und Niedersachsen die für die Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes notwendigen Parameter zu erheben, die der Kalibrierung und anschließenden Validierung dienen. Darüber hinaus sollten die eingesetzten Messverfahren sowie die Simulationsmodelle bezüglich ihrer Handhabbarkeit und Qualität optimiert werden.

In der bisherigen Ausgestaltung des Level-II-Programms steht der Kohlenstoffkreislauf nicht im Mittelpunkt. Zukünftig sollte der Kohlenstoffkreislauf jedoch eine wichtigere Rolle beim Monitoring einnehmen. Deshalb ist es notwendig, für das intensive Monitoring neue Ansätze zu suchen, mit denen die Quellen-Senken-Funktion des Bodens für Kohlenstoff besser beschrieben werden können. Bisher wurden im Level-II-Programm Parameter erhoben, die unmittelbar den Kohlenstoff betreffen, wie z.B. der Zuwachs der Bestände oder die Kohlenstoffinventuren der Böden. Ferner gibt es Größen, die mittelbar zur Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufes beitragen und die fakultative Messgrößen des Level-II-Programms sind. Zu dieser Gruppe zählen die Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit, die die Mineralisation organischer Substanz im Boden wesent-

lich beeinflussen. In der Liste der bisher erhobenen Parameter fehlen einige, die unmittelbar die Kohlenstoffumsätze beschreiben, wie z.B. die Bodenrespiration, und es fehlen Auswertungsansätze, die die Kohlenstoffumsätze in ihrer Gesamtheit modellhaft quantifizieren.

Diese Lücken sollen mit den hier vorgestellten Untersuchungen geschlossen werden. Es wurde geprüft, ob die Erhebung zusätzlicher Parameter auf den Level-II-Flächen sowie die Anwendung von Modellen die Charakterisierung der Quellen-Senken-Funktion der Waldökosysteme für Kohlenstoff im Rahmen des Monitorings verbessern. Darauf fußend werden Empfehlungen hinsichtlich der Integration der geprüften Messverfahren und der Modelle in das Monitoring-Verfahren gegeben.

### Untersuchungsprogramm

Im Einzelnen ging es um die Messung der CO<sub>2</sub>-Respiration, die Analyse der organischen Substanz des Bodens und der organisch gebundenen Nährstoffe. Die Ergebnisse dieser Messungen sowie der Routineuntersuchungen auf den Level-II-Flächen dienen der Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle „4C“ und „BIOME-BGC“. Ferner wurde bei der Validierung der Modelle auf längere Zeitreihen außerhalb des Level-II-Programms zurückgegriffen, um Langzeitentwicklungen der Kohlenstoffvorräte im Boden und im Bestand mit einzubeziehen.

Für die ergänzenden Untersuchungen und Simulationen zum Kohlenstoffhaushalt wurden Dauerbeobachtungsflächen aus drei verschiedenen Programmen ausgewählt:

- 21 Level-II-Flächen des EU-Forest Focus Programms
- 1 Fläche des Integrated-Monitoring Programms (UBA)
- 30 Flächen der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) der Landesforstanstalt Eberswalde

## Bodenanalyse mit Nahinfrarot-Spektroskopie

Die Untersuchung der organischen Substanz des Bodens und der organisch gebundenen Nährstoffe zeigte, dass das eingesetzte neue Verfahren der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) gut für die Untersuchung von Waldböden geeignet ist. Bei dieser Methode wird das Probematerial mit Licht im Infrarot-Bereich bestrahlt. Die Spektren des durchgelassenen Lichtes werden mittels eines Computerprogramms analysiert und mit den Werten der chemisch bestimmten Gehalte von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Kalium, Calcium und Magnesium in Beziehung gesetzt. Diese Beziehungen waren sowohl im Auflagehumus wie auch im oberen Mineralboden sehr straff ( $R^2$ : 0,76 bis 0,96 im Auflagehumus; siehe Abb. 1)

Mit diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit der Nah-Infrarot-Spektroskopie ein Werkzeug zur Verfügung steht, das für die Abschätzung der in der organischen Substanz enthaltenen Elementgehalte in hohem Maße geeignet ist. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die wichtigsten Kenngrößen ohne nasschemische Aufbereitung der Proben (lediglich Homogenisierung) an einer Probe mit einer Messung erfasst werden können. Bei der großen Variabilität der Bodenkenngößen erlaubt der Einsatz der NIRS daher die kostengünstige Analyse größerer Probenkollektive.

## Boden-Respirationsmessungen

Die Veratmung organisch gebundenen Kohlenstoffs durch die Wurzeln und die Bodenorganismen bestimmt i.W. den Kohlenstofffluss vom Boden in die Atmosphäre. Wenn dieser Fluss bekannt ist, kann er zur Kalibrierung und Validierung von Kohlenstoff-Modellen genutzt werden. Auf ausgewählten Flächen wurden diese Messungen durchgeführt, um einerseits Messreihen für die Bewertung der Computermodelle zur Verfügung zu stellen und andererseits das Messverfahren auf seine Praxistauglichkeit im Monitoring zu prüfen.

Bei diesem Verfahren wird ein Ring (Durchmesser 30 cm) auf den Boden gesetzt oder, wenn die Wurzelatmung ausgeschlossen werden soll, 30 bis 40 cm in den Boden getrieben. Zur Messung der  $\text{CO}_2$ -Atmung wird der Ring oben mit einem Deckel abgeschlossen, und es wird sofort und nach etwa einer halben Stunde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in dem abgedeckten Ring mit einem Infrarot-Gasanalysator gemessen (siehe Abb. 2). Aus der Differenz der

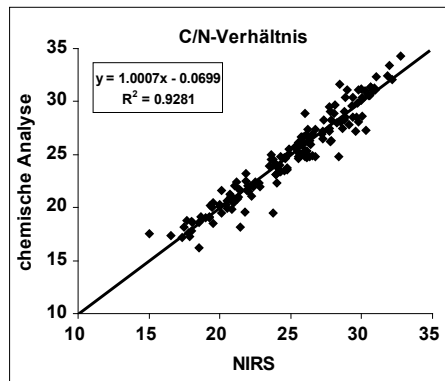


Abb. 1: Kalibrierung der Nahinfrarot-Spektren (NIRS) für das C:N-Verhältnis in der organischen Auflage

beiden Messungen lässt sich der  $\text{CO}_2$ -Fluss aus dem Boden berechnen. Das Messverfahren ist billig und einfach zu handhaben; für den Monitoring-Routinebetrieb hat es sich als gut geeignet erwiesen.

## Modellierung

Die Kohlenstoffflüsse und -vorräte in einzelnen Ökosystemkompartimenten lassen sich quantitativ am besten in Simulationsmodellen beschreiben; Messungen können i.d.R. nur Teilaspekte abdecken. Die Simulationsprogramme bilden das Wachstum von Wäldern und deren Stoffhaushalt in Abhängigkeit von meteorologischen und Standortbedingungen ab. In den Modellen wird das Wachstum durch die Energie-, Wasser- und Stoffzufuhr (z.B. Stickstoff) aus der Atmosphäre angetrieben.

Die Arbeiten der Modellierung gliedern sich in vier Teilschritte:

**1. Initialisierung:** Eingabe von Daten, die den Zustand des zu simulierenden Ökosystems zu Beginn des Simulationszeitraums beschreiben; dazu gehören z.B. der Kohlenstoffvorrat im Boden und im Bestand zu Beginn des Simulationszeitraumes.

**2. Modellparametrisierung:** Ableitung von baumarten- und standortspezifischen pflanzenphysiologischen und bodenphysikalischen Modellparametern für die im Modell enthaltenen Gleichungen.

**3. Sichtung und -bereitstellung der Daten der Triebkräfte:** Es handelt sich um unabhängige Variable, welche die Entwicklung des Systems treiben; im wesentlichen Wetter-, Stickstoffdepositions- und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationszeitreihen.

**4. Modellkalibrierung:** Vergleich von modellierten mit unabhängig gemessenen Größen, z.B. die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte im Bestand und im Boden oder die Zeitreihen der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung aus dem Boden. Gegebenenfalls sind Anpassungen der Modellparameter erforderlich.

Der Kohlenstoffhaushalt terrestrischer Ökosysteme kann mit dynamischen Prozessmodellen nur dann annähernd realistisch abgebildet werden, wenn sichergestellt ist, dass auch die wesentlichen systeminternen Einflussgrößen, wie der Wasserhaushalt oder die Bodentemperatur, realistisch simuliert und dass die wesentlichen Rückkopplungsmechanismen berücksichtigt werden. Die Bodentemperatur stellt eine wesentliche Einflussgröße der bodenbiologischen Umsatzbedingungen dar. Sie hat weiterhin Einfluss auf die Berechnung der Erhaltungsrespiration von Stamm und Wurzelholz. Die korrekte Simulation des Wasserhaushalts ist ebenfalls essenziell, insbesondere für Standorte, bei denen der Wasserhaushalt eine limitierende Rolle bei der Photosynthese, den Allokations- oder den Zersetzungsprozessen spielt.

Die Steuerung der  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsraten aus dem Boden ist vergleichsweise komplex, weil sie am Ende der Prozesskette „Kohlenstoffbindung im Baum (Absterben von Baumteilen [z.B. Streufall]) Streuabbau“ steht. Dennoch wird die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung mit den Modellen recht gut beschrieben. In beiden Modellen „4C“ und „BIOME-BGC“, die zur Anwendung



Fotos: C. Schultz

Abb. 2: Messkoffer mit Datenlogger, Temperaturmessgerät und Fühlern für Luft- und Bodentemperatur (links) sowie geschlossene Messkammer mit grauen Ein- und Ausgangsschläuchen zum  $\text{CO}_2$ -Messgerät, weißem Überdruckschlauch und grünem Kabel zum Temperaturfühler im Deckel (rechts)

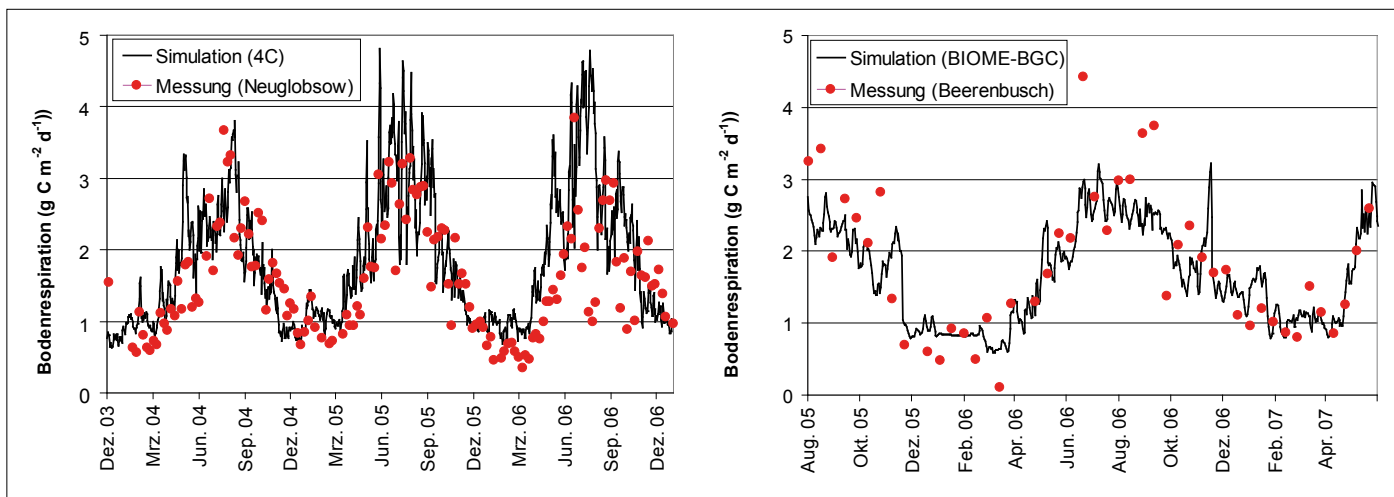


Abb. 3: Bodenrespiration auf den Flächen Neuglobsow und Beerenbusch (Punkte: gemessene Werte, Linien: modellierte Werte mit Modell „4C“ (Neuglobsow) und „BIOME-BGC“ (Beerenbusch))

kamen, wird der Jahresgang der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung nachgezeichnet: Im Winter sind die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsraten geringer und im Sommer sind sie hoch (Abb. 3). Hinsichtlich des Niveaus der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung gibt es teilweise Abweichungen, die im Rahmen der weiteren Modellentwicklung reduziert werden sollten.

### Folgerungen für das Monitoring

Die Ergebnisse zeigen, dass die Modellierung als Instrument für die Auswertung der Messdaten im Rahmen des Monitorings geeignet ist. Der Wasserhaushalt von Wäldern wird mit den beiden Modellen „4C“ und „BIOME-BGC“ realistisch abgebildet. Auch die Simulation wichtiger Prozesse des Kohlenstoffhaushalts, z.B. die Entwicklung der Blattmasse und des Blattflächenindex, des Streufalls von Blättern bzw. Nadeln und des Stammzuwachses kann als valide angesehen werden.

Die Untersuchungen haben Hinweise zur Verbesserung der Modelle gegeben. Je nach Modell sind Weiterentwicklungen in folgenden Bereichen erforderlich:

- Energiezufuhr in den Boden,
- Baumform,
- Allokation,
- Schneespeicherung in den Baumkronen,
- Verdunstung durch die Bodenvegetation,
- Mehrschicht-Modellkonzeption beim Boden-C-Umsatz und der Bodentemperatur,
- Mischbestandsmodell,
- Fruktifikation,
- Saisonalität des Nadelstreufalls und der spezifischen Blattfläche,
- Begrenzung der Transpiration bei Trockenstress und die Begrenzung der Zersetzung unter Bedingungen von Sommertrockenheit.

Es ist geplant, zu allen Modellparametern Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen

durchzuführen. Vor allem betrifft dies Parameter, zu denen Messdaten nur schwer beschaffbar sind (Allokationsparameter, Anteile von löslichen Substanzen, Cellulose und Lignin in den Biomasse-Kompartimenten).

Die Messungen zum Boden-C-Vorrat sind aufgrund der räumlichen Heterogenitäten der einzelnen Messparameter (C-Konzentration, Bodendichte, Skelettgehalt) mit großen Unsicherheiten behaftet, die eine Erfassung abgesicherter Trends im Boden-C-Vorrat verhindert. Die begonnenen Messungen der  $\text{CO}_2$ -Emissionsraten können hier Abhilfe leisten.

Die Modellierungsarbeiten haben auch gezeigt, dass weitere Anstrengungen bezüglich der Datenbeschaffung und Datenqualität erforderlich sind. Es wird empfohlen, ein Konzept zur Haltung von Metadaten zur Beschreibung von zusätzlich verfügbaren Daten, die nicht in der Level-II-Datenbank enthalten sind, sowie ein Konzept zum Füllen von Datenlücken zu erarbeiten.

Für die Optimierung der Nutzbarkeit der Level-II-Daten in der Modellierung des Kohlenstoffhaushalts können folgenden Empfehlungen abgeleitet werden:

- Mit der Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) ist eine Methode verfügbar, die mit vertretbarem Aufwand zum einen große Zahlen von Kohlenstoffanalysen möglich macht und zum anderen die Ermittlung einer Vielzahl anderer Bodenkenngrößen erlaubt, die für die Modellierung des Kohlenstoffhaushalts benötigt werden.
- Die Zahl der Monitoringflächen mit Streufallmessungen im optionalen Programm sollte erweitert werden. Die Streufallmessungen erlauben einen Test der modellierten interannuellen Variabilität der oberirdischen Allokation.

- Bodenrespirationsmessungen auf ausgewählten Plots sollten in das optionale Programm aufgenommen werden. In Analogie zu den Messungen des Bodenwasserergehalts dienen Bodenrespirationsmessungen dazu, die Reproduktion der intra- und interannuellen Variabilität durch die Modelle zu überprüfen. Dies stellt einen wesentlichen Schritt zur Reduktion der Fehlerspannen bei der Modellanwendung für die Schätzung von Änderungen in den Bodenkohlenstoffvorräten dar.

- Messungen bodenphysikalischer Kenngrößen (Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Skelettgehalt, Porenvolumen, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt) sind dem Pflichtprogramm hinzuzufügen. Diese mit begrenzten Kosten einmalig zu erhebenden Größen bilden eine wichtige Grundlage für die Beschreibung des Bodenwasserhaushalts, der bei der Abschätzung des Stoffhaushalts eine entscheidende Komponente ist.

- Es sollten Messungen von Bodentemperatur und Bodenwasserergehalt im optionalen Programm in einem Netz von repräsentativen Plots für 1 Jahrzehnt durchgeführt werden. Damit können Modelltests in einem weiten Bereich von edaphischen Bedingungen durchgeführt und die Anwendbarkeit der Modelle für ein breites Spektrum von Böden sichergestellt werden.

Die Untersuchungsergebnisse machen deutlich, dass es in Kombination von Monitoring (Level I und Level II) und Modellierung möglich wird, standortbezogen die Wirkungen des Klimawandels und von forstlichen Eingriffen zu quantifizieren und zu bewerten und die Berichterstattung zum Kyoto-Protokoll wirkungsvoll zu unterstützen. ◀