

Jörg Matschullat (MLS), Sophie von Fromm\*,  
Roberval Monteiro Bezerra de Lima\*\*

## **Bodenatmung (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), Landnutzung und Klima am Beispiel Amazonasbecken**

### **Kurzfassung**

Böden wirken als Quellen und Senken für Treibhausgase (THG) wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O). Um verlässliche globale Budgets berechnen zu können, sind präzise Quantifizierungen notwendig, da sowohl die Speicherfähigkeit als auch die Emissionswirksamkeit von Böden sehr hoch sein können. Solche Budgets sind regional für ein besseres Landnutzungsmanagement (Land- und Forstwirtschaft) und global für offene Fragen zum globalen Wandel einschließlich Klimawandelfragen erforderlich.

Dieser Beitrag diskutiert ausschließlich den Anteil der mit der Bodenemission verbundenen Prozesse und deren steuernde Parameter. Dazu wurden Studien ausgewertet, welche die wichtigsten Typen von Landbedeckung und Klimazonen berücksichtigten. Die dazu notwendigen Methoden werden kurz vorgestellt. Im Fazit werden aktuelle Wissenslücken und der offensichtliche Bias zugunsten der (europäischen) Nordhemisphäre angesprochen.

Nutzt man einen konservativen globalen Durchschnittswert von 300 mg CO<sub>2</sub>e m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (basierend auf unserer Literaturstudie), so berechnen sich globale Netto-Bodenemissionen in der Größenordnung von mehr als 350 Petagramm CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub>e = CO<sub>2</sub> Äquivalente = gesamter Effekt aller Treibhausgase, normalisiert auf CO<sub>2</sub>). Dies entspricht etwa 21% der globalen Bodenvorräte an Kohlenstoff und Stickstoff. Zum Vergleich, 33.4 Petagramm CO<sub>2</sub> werden jährlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zementindustrie freigesetzt.

Um den angesprochenen Bias ausgleichen zu helfen, konnte im Amazonasbecken (Bundesstaat Amazonas) eine erste Geländekampagne im Febru-

---

\* TU Bergakademie Freiberg

\*\* Embrapa Amazonas Ocidental

ar/März 2016 (Regenzeit) durchgeführt werden. Die Daten zeigen eine um 25% niedrigere Bodenfeuchte unter Wald gegenüber Nachnutzungsflächen sowie eine um 70% höhere Bodenatmung ( $\text{CO}_2$ ) der Waldböden gegenüber den Nachnutzungsflächen. Die Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen sind in den Böden unter Wald um ca. 40% (C) bzw. 15% (N) höher als bei den Nachnutzungsflächen. Die beschriebenen Unterschiede werden hier hypothetisch auf den höheren Stoffumsatz in den Waldgebieten und eine höhere Evapotranspiration, bzw. auf eine höhere Nährstoffentnahme auf den Nachnutzungsflächen zurückgeführt. Folgekampagnen werden zeigen, wie robust die neuen Daten sind.

## 1 Einleitung

Böden sind Quelle und Senke für Treibhausgase (THG) wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Da Speicherung und auch Emission sehr hoch sein können, sind für belastbare globale Haushaltsberechnungen präzisere Quantifizierungen nötig. Diese dienen Fragen zu Landnutzungs-Management (Land- und Forstwirtschaft), globalem Wandel und Klimaforschung (Oertel et al. 2016).

Die Messung von Boden- und Ökosystematmung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen – es gibt bis heute keine Normverfahren oder offizielle Empfehlungen (Oertel et al. 2016; Pumpanen et al. 2012). Fernerkundungsmethoden einschließlich der Beobachtung von Flugzeugen, die im Hinblick auf Flächenrepräsentativität optimal wären, leisten derzeit noch nicht die notwendigen Ortsauflösungen und Präzision der Gaskonzentration, um damit mehr als relativ allgemeine Aussagen treffen zu können. Eddy-Kovarianzverfahren sind erheblich viel genauer und lassen sich, installiert auf Türmen, auch für größere Flächen sinnvoll einsetzen. Ein Nachteil kann es sein, dass turbulente Luftbewegung notwendig ist, um sinnvolle Daten ermitteln zu können – meist unmöglich zum Beispiel innerhalb von Wäldern. Ein weiterer Nachteil kann es sein, dass sie stationär sind. Kammersysteme dagegen können – je nach Typ – durchaus einfach bewegt werden, so dass sich auch komplexere Flächen systematisch und repräsentativ beproben lassen. Schließlich lassen sich Boden- und Ökosystematmung auch modellieren – Voraussetzung dazu sollten jedoch belastbare Daten sein.

Der Übersichtsartikel von Oertel et al. (2016) erfasst den aktuellen Stand weltweit ermittelter und in referierten Zeitschriften publizierter Daten aller wesentlichen Landnutzungstypen und aus allen Klimazonen (Ausnahme polare Klimate). Dabei wird deutlich, dass der Großteil belastbarer Daten

von der Nordhemisphäre stammt; mit einem Schwerpunkt auf der temperierten Klimazone und vor allem den europäischen Ländern. Gerade für die (Sub)Tropen ist die Datenlage eher als spärlich zu bezeichnen und der Spreizbereich der Daten ist hier, besonders für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O überdurchschnittlich hoch (Tab. 1). Dieser Bias der aktuellen Datenlage motivierte in unserer Arbeitsgruppe die Entwicklung eines mobilen und robusten geschlossenen, dynamischen Kammersystems (Oertel et al. 2015), um in Kooperation mit Partnern entsprechende Untersuchungen durchführen zu können.

Tab. 1: Flüsse der Bodenemission von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O in allen wesentlichen Klimazonen und Landnutzungsformen (Daten aus Oertel et al. 2016)

	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	$\mu\text{mol N}_2\text{O} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
	<b>Wald</b>		
temperiert	1,971,1	-3,420,44	0,410,15
mediterran	Keine Daten	Keine Daten	Keine Daten
(sub)tropisch	3,41,67	-2,750,42	1,232,09
	<b>Grasland/Weide</b>		
temperiert	0,5 – 8,0 (max. 25)	-3,5 – 0,04 (max. 1,6)	0,03 – 9,7 (max. 180)
mediterran	0,5 – 2,7	0,02 – 0,15	0,02 – 0,15
(sub)tropisch	0,7 – 1,3 (max. 7,9)	-35,1 – -0,9 (max. 3,0)	0,02 – 0,6 (max. 11)
	<b>Ödland/Wüsten</b>		
temperiert	0,2 – 3,7 (min. -0,24)	-3 – -0,52	-0,08 – 10
mediterran	2,4 – 3,1	Keine Daten	Keine Daten
(sub)tropisch	0,035 – 1,6 (max. 9,9)	Keine Daten	Keine Daten
	<b>Ackerland</b>		
temperiert	0,45 – 8,2	-0,41 – -0,16	0,01 – 4,3 (max. 10,7)
mediterran	1,1 – 1,7	-0,45 – 0,13	0,02 – 1,36
(sub)tropisch	7,0 – 17,9	Keine Daten	0,27 – 2,26
	<b>Feuchtgebiete</b>		
temperiert	1,2 – 8,1	-1,8 – 28 (max. 810)	-1,6 – 4,4
mediterran	1,0 – 5,5	278 – 437	4,7
(sub)tropisch	1,8 – 9,2	< 1 – 7800	-7 – 27
<b>Gesamtspreize</b>	0,035 – 25	-35,1 – 7800	-7 – 180

Zugleich ist es von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis vor allem der Kohlenstoff- und Stickstoffkreisläufe, die Reservoirgrößen dieser Komponenten in den Böden der Welt möglichst präzise zu kennen und mit ebenso hoher Genauigkeit auch die Gasflüsse in die und aus den Böden zu erfassen, differenziert nach klimatischen Bedingungen und Landnutzung. Für zahlreiche Fragen zu den Themen Globaler Wandel und Klimawandel ist dies von entscheidender Bedeutung.

Der vorliegende Beitrag referiert kurz den globalen Status, basierend auf Oertel et al. (2016) und diskutiert erste Ergebnisse eines laufenden Projektes im Bundesstaat Amazonas, Brasilien. In diesem Projekt (EcoRespira-Amazon: <http://blogs.hrz.tu-freiberg.de/ecorespira/>) werden erstmals im direkten Vergleich jeweils (Sekundär)Waldböden (unter Kronentraufe) mit Böden benachbarter Nachnutzungsflächen (Weideland, Ackerflächen, Baumplantagen) bearbeitet. Ziel ist die Beantwortung der Frage, welche Treibhausgas(THG)emissionen diese Böden zeigen, ob es Unterschiede beim selben, benachbarten Bodentyp zwischen Wald und beliebigen Nachnutzungen gibt, wie die Bodenvorräte an organischem Kohlenstoff und an Stickstoff beschaffen sind und ob sich daraus Konsequenzen für die längerfristige Aufnahme bzw. Abgabe von THG ergeben?

## 2 Methodik und Qualitätskontrolle

Daten der weltweiten Bodenemissionen (positiv oder negativ) wurden aus etwa 350 referierten Publikationen zusammengetragen und auf einheitliche Flussraten umgerechnet ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\mu\text{mol CH}_4$  bzw.  $\text{N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) – Oertel et al. (2016). Dieser „Status Quo“ lässt sich mit Ergebnissen noch aktuellerer Arbeiten direkt vergleichen. Dabei kann es problematisch sein, dass nicht alle Arbeitsgruppen und Autoren in ihren Veröffentlichungen alle Randbedingungen erfassen bzw. veröffentlichen, die das Entgasungsverhalten mitbestimmen (Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Nährstoffzustände, Landnutzung, Vegetation, etc.). Dies kann einen direkten Vergleich bzw. die Interpretation der Daten erschweren.

Im Rahmen des Projektes EcoRespira-Amazon wurden im zentralen und südwestlichen Amazonastiefland im Februar und März 2016 (Regenzeit) mit dem Projektpartner Embrapa erstmals Flächen mit (Sekundär)Waldbestand, beziehungsweise Nachnutzungsstandorte in unmittelbarer Nachbarschaft herausgesucht (Abb. 1). In Summe wurden 25 Standorte an zwölf Lokationen beprobt (Bodenprobenahme) und die Bodenentgasung ( $\text{CO}_2$ )

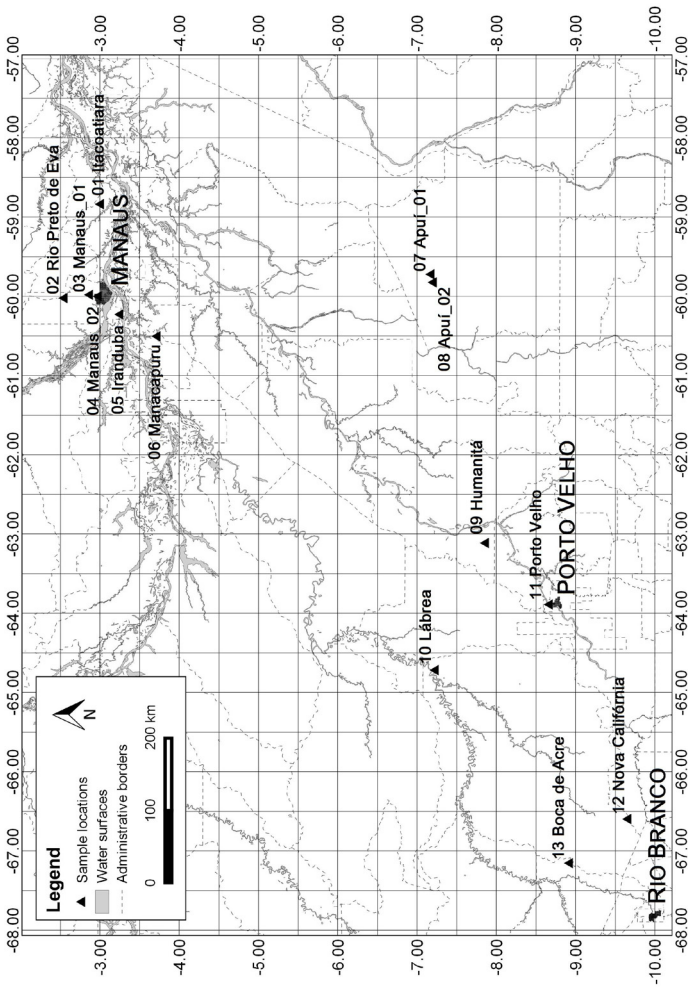


Abb. 1: Karte des südwestlichen Teils vom Amazonastiefland mit den Positionen aller Probenahme Lokationen der ersten Geländekampagne EcoRespira-Amazon (Februar und März 2016) sowie den Bundeshauptstädten Manaus (Amazonas), Porto Velho (Rondônia) und Rio Branco (Acre)

direkt vor Ort gemessen. Parallel dazu wurden sequentiell Gasproben über ein Interface an den Kammern entnommen für die spätere Analyse von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O im Labor.

*Bodenproben:* Mittels eines holländischen Bodenbohrers (Trado Holandes TP-4<sup>cc</sup>, Sondaterra, Piracicaba, SP, Brasilien) wurden an jedem Standort von mindestens drei Substandorten jeweils mineralischer Oberboden (0–20 cm; TOP) sowie nach Überbohren bis 30 cm mineralischer Unterboden (30–50 cm; BOT) entnommen. Beides zusammen entspricht dem Hauptwurzelraum aller Pflanzen. Die jeweiligen TOP und BOT Proben wurden homogenisiert und zu einer Mischprobe je Standort vereinigt (Kompositprobe). Das Probenmaterial wurde in beschriftete Rilsan® Probenbeutel (Tub-Ex, Dänemark) eingefüllt und vor dem Transport luftdicht verschlossen. Vor der Bodenbohrung wurde das organische Oberbodenmaterial (Humus, Mull, Moder, etc.) manuell (Laborhandschuhe aus Latex) entfernt. Dieses Material (ORG) wurde auf der gesamten Standortfläche wiederum mit Laborhandschuh-geschützten Händen repräsentativ gesammelt und zu einer Standortprobe in einem kodierten Baumwollbeutel vereint und für den Transport fest verschlossen. Insgesamt wurden bislang je 24 Kompositproben TOP und BOT sowie 23 Kompositproben ORG gewonnen.

Nach Bodenhomogenisierung und Teilung im Labor (Embrapa Manaus) wurden die Aliquote in unser Labor in Freiberg transportiert. Es folgte eine nochmalige Probentrocknung im Trockenschrank (30°C über 24 bis 48 Stunden nach Bedarf). Anschließend wurde das Material mittels Planetenkugelmühle (Pulverisette 7, Fritsch, Idar-Oberstein) bzw. Scheibenschwingmühle (RS 200, Retsch, Haan), jeweils mit Achatmahlwerkzeugen analysenfein (< 63 µm) vermahlen und mit Prüfsieben auf vollständige Verkleinerung geprüft. An nicht vermahlenem Originalmaterial wurden die elektrische Leitfähigkeit der Bodenlösung und der Boden-pH-Wert (EGA 161, Sensortechnik Meinsberg, Waldheim) gemessen. Im Folgenden wird allein auf das TOP Material eingegangen.

20 mg analysenfeinen TOP-Materials jeder Probe (n=24) wurde mit einer Analysenwaage in Zinnschiffchen eingewogen, mit 60 mg Wolfram(VI)-oxid als Katalysator versehen und das Zinnschiffchen fest verschlossen. Kalibrierung und Tagesfaktorbestimmung erfolgten mit Sulfanilsäure. Zertifiziertes Referenzmaterial und ein In-House-Standard tropischen Bodens (BraSol) wurden als unbekannte Probe zusätzlich dem Probensatz hinzugefügt. Anschließend wurden die Gesamtkonzentrationen von Gesamtkohlenstoff, Stickstoff und Schwefel quantitativ mit einem Elementaranalysator

(El Cube, Elementar Analysensysteme, Hanau) bei Erhitzen auf 1.150°C unter Sauerstoffzufuhr mit Infrarot- bzw. Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestimmt. Die Bestimmungsgrenzen lagen bei C: 0,04, N: 0,003, S: 0,003 Gew.-%. Doppelproben reproduzierten stets den exakt gleichen Wert für Kohlenstoff; bei Stickstoff und Schwefel lagen die Abweichungen bei unter 5% relativ. Referenzmaterial (ORIS, BraSol und BHA-1) wurde stets im zugelassenen Schwankungsbereich reproduziert.

*Gasproben:* Für die Gasmessungen und -beprobungen wurden zwei manuelle, geschlossene dynamische Kammer Systeme SEMACH-FG mit einem Infrarot-Spektrometer (CARBOCAP™ Kohlendioxid-Sonde GMP343, Vaisala, Finnland) eingesetzt. Das in Freiberg entwickelte System (Oertel et al. 2015) wurde speziell für tropische Umweltbedingungen optimiert. Die Ermittlung der Bodenentgasung erfolgte zweistufig. An jedem Standort wurde an drei Stationen, die den jeweiligen Standort repräsentativ abbilden sollen, jeweils mindestens drei Wiederholungssequenzen durchgeführt. Dazu wird die manuelle Kammer auf zuvor installierte Bodenringe gasdicht aufgesetzt, nachdem das eingebaute Infrarot-Spektrometer eine stabile Basislinie der umgebenden CO<sub>2</sub>-Konzentration zeigt. Jede Messsequenz dauert ca. sechs Minuten. Damit liegen drei Wiederholungen für die CO<sub>2</sub>-Flussberechnungen vor; insgesamt mindestens neun pro Standort. Eine Qualitätskontrolle findet während der Messungen visuell (Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Kammer) und nochmals zum Zeitpunkt der Gasflussberechnungen statt, in der alle Einzelwerte geprüft werden (Plausibilitätsprüfungen). Es wurden insgesamt 256 Messzyklen an den 25 Standorten durchgeführt.

Die zweite Stufe beginnt mit der dritten Wiederholungssequenz. Gleich zu Beginn der CO<sub>2</sub>-Messung wird über eine Luer-Lock Kupplung an der Kammer mittels einer 12 mL Spritze eine Gasprobe (Nullprobe) entnommen und mit einer Kanüle in evakuierte Exetainer® Glasflaschen mit doppelem Septum (5,9 mL; 819W; Labco, England) als Überdruck eingeführt. Mit Abschluss der CO<sub>2</sub>-Messsequenz wird die nächste Gasprobe gezogen. Dieser Vorgang wiederholt sich nun alle fünf Minuten und wird nach 30 Minuten gestoppt. Der IR-Sensor zeigt in der Regel nach spätestens fünf bis sieben Probenahmen (etwa 30 Minuten), die Maximalkonzentration von 1.000 ppmv an. Nach den Probenahmen an jeweils einer Lokation werden Spritze und Kanüle entsorgt, um Ermüdungserscheinungen des Materials vorzubeugen. Die Gasproben werden umgehend nach der Probenahme in einen innen mit Schaumstoff ausgekleideten Peli®-Transportkoffer (Pelican Products, USA) überführt, womit die Proben sicher vor Erschütterungen,

Druckschwankungen etc. gelagert und transportiert werden können. Insgesamt wurden 503 Gasproben genommen.

Im Labor werden die Glasflaschen nach Temperierung auf Raumtemperatur gemeinsam mit Prüfgasproben zur Qualitätskontrolle in erratischer Reihenfolge in einen kalibrierten Gaschromatographen (SRI 8610C, SRI Instruments, USA) injiziert und jeweils die Konzentrationen von CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O quantitativ bestimmt. Die erratische Probensequenz dient der weiteren Qualitätskontrolle. Nach Abschluss der Analysen werden die Ergebnisse in der jeweils logischen Sequenz pro Standort in Flussraten umgerechnet.

*Randbedingungen:* Die zum Zeitpunkt der Probenahme vorherrschenden Bedingungen (Witterung, Temperatur und Feuchte von Luft und Boden) wurden während der Messungen und Probenahmen ebenso wie die Ermittlung der genauen Koordinaten mittel GPS (Map 64s, Garmin, USA) an jedem (Sub)Standort aufgezeichnet. Dazu gehört auch jeweils eine Photodokumentation (Beispiele siehe <http://blogs.hrz.tu-freiberg.de/ecorespira/>).

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Status der globalen Bodenemissionen

Durchschnittliche Flüsse der Bodenatmung für die wesentlichen Landnutzungstypen und Klimazonen zeigt Tabelle 1. Die Daten stammen durchgehend aus der dem Übersichtsbeitrag von Oertel et al. (2016) zugrunde liegenden Literatur. Datenlücken sind ebenso zu erkennen wie zum Teil eine große Spreizbreite der Daten über diverse Größenordnungen. Beides reflektiert den noch ungenügenden Kenntnisstand, ganz besonders zu (sub)tropischen Gebieten.

Rechnet man dennoch die globale Bodenatmung aller Klimazonen (außer polar) und in den wesentlichen Landbedeckungsformen Wald, Gras- und Weideland, Ödland, Agrarland und Feuchtgebiete auf dem aktuellen Kenntnisstand zusammen, erhält man einen konservativen Durchschnittswert von 300 mg CO<sub>2</sub>e m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Oertel et al. 2016). Dies sind umgerechnet globale jährliche Netto-Bodenemissionen von  $\geq 350$  Pg CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub>e = CO<sub>2</sub>-Äquivalente = Gesamteffekt der THG CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O, auf CO<sub>2</sub> normalisiert). Dies wiederum entspräche 21% der globalen C- und N-Vorräte in Böden. Zum Vergleich: 33,4 Pg CO<sub>2</sub> werden jährlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zementindustrie emittiert (IPCC 2014).



Wichtig ist hierbei zu bedenken, dass Emissionen sowohl aus Wäldern als auch anderen pflanzenbedeckten Gebieten zum Teil (durchschnittlich circa 50%) wieder von den Pflanzen selbst aufgenommen werden. Die Bodenatmung entspricht damit nur einer Teilmenge der tatsächlich netto freigesetzten THG in die Atmosphäre. Um jedoch die Prozesse und deren Wirkgrößen im Boden richtig zu verstehen, ist die direkte Ermittlung der Bodenatmung von wesentlicher Bedeutung.

### *3.2 Bodenemissionen Amazonasgebiet*

Angesichts der unbefriedigenden Datenlage aus tropischen Gebieten gelang es, das interdisziplinäre und bi-nationale Forschungsprojekt EcoRespira-Amazon (<http://blogs.hrz.tu-freiberg.de/ecorespira/>) zu gewinnen. Die brasilianischen Partner sind die Staatliche Boden- und Agrarbehörde Embrapa, das Institut zum Schutz von Amazonien IPAAM und die Bundesuniversität von Amazonas, UFAM. Assoziiert ist das Nationale Institut für Amazonasstudien INPA, alle in Manaus. Gekoppelt an das Projekt ist die Entwicklung eines computergestützten numerischen Modells zur nachhaltigeren Landnutzung (ModelCFAmazon).

Die Projektpartner wählten Lokalitäten aus, die sowohl Waldbestände als auch Nachnutzungsflächen (Land- und Weidewirtschaft, Agroforst) in unmittelbarer Nachbarschaft voneinander aufweisen – und in der Regenzeit ohne übermäßigen zeitaufwändigen oder kostenintensiven Aufwand (Hubschrauber, Boot) erreichbar sind. Die erste Geländekampagne fand von Februar bis März 2016 statt. Dies ist vor Ort die „Regenzeit“. Die gewonnenen Ergebnisse müssen unter der Einschränkung möglichen Bias durch die dabei herrschenden Randbedingungen gesehen werden. Alle Waldstandorte sind als Sekundärwald einzuordnen; Primärwälder waren nicht in erreichbarer Nähe von Straßen oder anderen Infrastrukturen anzutreffen.

Erst nach Projektabschluss und zwei weiteren Geländekampagnen während der „Trockenzeit“ im Juli und August 2016 sowie einer weiteren „Regenzeit“ im Februar und März 2017 lassen sich robustere Daten vorlegen. „Regen-“ beziehungsweise „Trockenzeit“ in den inneren feuchten Tropen sind relative Begriffe, da es klimatologisch betrachtet keine wirklich trockenen Bedingungen gibt. Allerdings treten seit dem Jahr 2005 bereits mehrfach regional tatsächlich Trockenbedingungen auf, die vermutlich als ein Signal regionaler Klimaveränderungen interpretiert werden müssen (Lewis et al. 2011; Phillips et al. 2009).

*Bodenbedingungen:* Die Böden aller Standorte sind der Gruppe der Ferralite (Latosole) zuzuordnen, eisenreiche und tonmineralreiche Böden, die dennoch überwiegend durch gute Drainage, einen niedrigen pH-Wert (3,5–4,5) und niedrige Fruchtbarkeit charakterisiert sind.

An allen Lokationen und Standorten wurden flächenrepräsentative Messungen der Bodenfeuchte mittels TDR-Sonden (Zeitbereichsreflektometrie) in den obersten zehn Zentimetern des Mineralbodens durchgeführt. Trotz großer kleinräumiger Schwankungen ergab sich im Hinblick auf die Medianwerte des Gesamtkollektivs ( $n=660$ ) eine klare Abgrenzung ( $\Delta=25\%$ ) zwischen Waldböden (31 Vol.-%) und den Böden der Nachnutzungsflächen (38 Vol.-%). Im Hinblick auf einzelne Standorte überlappen jedoch die Datensubkollektive. Wir vermuten, dass es zwei Parameter sind, welche die niedrigere Bodenfeuchte im Oberboden der Wälder erklären: die deutliche höhere Durchwurzelungsdichte im Wald und die damit gekoppelte höhere Evapotranspiration. Beides passt zu dem höheren Stoffumsatz (Metabolismus) in Wäldern gegenüber offeneren Flächen im Bereich der inneren Tropen.

*Bodenatmung:* In dieser ersten Phase liegen bislang erst die Ergebnisse der Vor-Ort Bestimmung der  $\text{CO}_2$ -Flüsse vor. Diese zeigen eine hohe Konsistenz und liefern ein klares Ergebnis: Der Gasfluss ( $\text{CO}_2$ ) ist im Durchschnitt (Medianwert) unter Wald um 70% höher ( $5,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) als auf den Nachnutzungsflächen ( $3,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Dabei war die Reproduzierbarkeit zwischen den Einzelmessungen (je drei bis vier Wiederholungen) an einem Substandort und zwischen den jeweils drei Substandorten eines Standortes hoch und deren Abweichungen untereinander geringer als die Ergebnisse zweier Standorte (Wald und Nachnutzung) an jeweils einer Lokation. Das ist ein äußerst klares Ergebnis und dennoch zu diesem Zeitpunkt nicht mehr als eine Momentaufnahme. Die Ergebnisse der nächsten zwei Kampagnen bleiben abzuwarten, um die Langzeitstabilität dieser Signale und damit ihre Flächenrepräsentativität ermitteln zu können.

*Kohlenstoffvorräte im Boden:* Im Gegensatz zu Bodenfeuchte und Bodenatmung ist die Ermittlung der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelkonzentrationen von unmittelbar repräsentativer Bedeutung, weil sich diese Werte nicht ohne größere Eingriffe kurzfristig ändern können. Die Waldgebiete zeigen für C und N höhere Werte als die Nachnutzungsflächen; bei S gleichen sich die Werte (Tab. 2). Daraus lässt sich auf größere C- und N-Vorräte schließen; die genauen Berechnungen dafür werden später vorgelegt. Von Bedeutung ist auch, dass die ermittelten C-, N- und S-Werte in Amazonas deutlich höher sind als im semiariden Nordosten Brasiliens und

im Mittel (Medianwerte) tatsächlich den durchschnittlichen Werten Europas gleichen (Tab. 2; Reimann et al. 2016).

Tab. 2: Gesamtkohlenstoff, Stickstoff und Schwefel (Gewichts-%) in den EcoRespira-Amazon (ERA) Bodenproben (TOP) im Vergleich zu Bodenproben aus Nordost-Brasilien (Projekte BraSol-2010 und Seridó) sowie Europa aus dem aktuellen GEMAS-Projekt von EuroGeoSurveys (Reimann et al. 2016. Angegeben sind stets der Spreizbereich und der Medianwert

	Cges (Gew.-%)	Nges (Gew.-%)	Sges (Gew.-%)	C : N : S
Wald ERA	1,02–2,60 (2,11)	0,088–0,202 (0,157)	0,017–0,046 (0,026)	81 : 6 : 1
Nachnutzung ERA	1,11–2,54 (1,54)	0,101–0,178 (0,136)	0,014–0,043 (0,027)	57 : 5 : 1
BraSol TOP	0,25–3,43 (0,68)	0,010–0,350 (0,060)	0,006–0,080 (0,030)	23 : 2 : 1
Seridó TOP	0,28–0,88 (0,43)	0,033–0,102 (0,044)	0,006–0,019 (0,008)	54 : 6 : 1
Europa Acker (Ap)	0,13–46,26 (2,23)	0,028–2,406 (0,169)	0,008–9,740 (0,034)	66 : 5 : 1

### 3.3 Einordnung EcoRespira-Amazon, Phase I, in einen größeren Rahmen

Für (sub)tropische Wälder legt die aktuelle Literatur einen Mittelwert von  $3,4 \pm 1,67 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nahe (Oertel et al. 2016; Tab. 1). Dem steht der aktuelle Medianwert im Amazonasbecken von  $5,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  mit einem Spreizbereich zwischen den zwölf Lokationen von 3,6 bis  $7,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  in der Regenzeit im Februar und März 2016 gegenüber. Der Literaturmittelwert mit seiner positiven Standardabweichung liegt somit nahe dem ermittelten Medianwert und lässt vermuten, dass in der Trockenzeit geringere Respirationsraten zu erwarten sind.

Bei (sub)tropischen Weide- ( $0,7\text{--}1,3$ ; maximal  $7,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) und Ackerflächen ( $7,0\text{--}17,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ergibt sich dagegen ein deutlich unklarerer Bild. Unsere Messungen ergeben einen Medianwert von  $3,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , zufällig exakt denselben Wert wie für die Waldflächen in der Literatur. Die Spreize unserer Messungen im Hinblick auf die Einzelstandorte im Amazonasbecken beträgt 1,7 bis  $6,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Damit liegen diese praktisch genau zwischen den Literaturwerten für die Weide- und Ackerflächen. Eine so klare Trennung zwischen Weideflächen (gering) und Ackerflächen (hoch) konnten wir bislang nicht feststellen.

Tab. 3: Herausforderung, Herangehensweise und Impact des Projektes EcoRespira-Amazon

	Wissenschaft	Gesellschaft
Herausforderung	Verlässliche und robuste Daten für die feuchten Tropen; globale Bedeutung	Überzeugende Argumente für nachhaltigere Landnutzung; Regionale und globale Übertragbarkeit (Tropen)
Herangehensweise	Weiterentwicklung SEMACH-FG Kammersystem für feuchte Tropen	Training für Studenten und Mitarbeiter (BR, DE); Kommunikation mit Landwirten und Stakeholdern
Impact	Bessere und nachgewiesene Daten zur Bodenatmung in feuchten Tropen; Rolle der Böden unter Wald versus alternativer Landnutzung	Ausbildung von Embrapa Experten für solche Ansätze, Aufbau von Projekten für detailliertere Fragen, z.B. Agroforstwirtschaft, Terra Preta do Indio, Nekromassendynamik, ... Anträge in Vorbereitung

### Schlussfolgerungen

Das Projekt EcoRespira-Amazon dient zwei Aspekten; der rein wissenschaftlichen Erkenntnis einerseits und gesellschaftlichen Interessen andererseits (Tab. 3). So bedarf es wissenschaftlich einer deutlich besseren Datenbasis für Ökosysteme der (Sub)Tropen als Grundlage für globale Modelle, mit denen fundamentale Fragen zum Globalen Wandel und zum Klimawandel bearbeitet werden. Von mehr als wissenschaftlichem Interesse ist bereits die Frage, ob die Waldböden einen „besseren“ Zustand haben als die Nutzungsböden und ob sich aus den ermittelten Daten Aussagen ableiten lassen, welche Bewirtschaftungsform besser oder weniger geeignet ist, um einen möglichst naturnahen und widerstandsfähigen Bodenzustand zu erhalten. Gesellschaftspolitisch ist die Frage nach alternativen Bewirtschaftungsformen von größter Bedeutung, denn die aktuell absehbare weitere Abholzung von Primärwald wird voraussichtlich zu einer Degradierung der Böden, zu sinkender Fruchtbarkeit und damit zu einem Teufelskreis stetig wachsender Abholzungsnotwendigkeit führen, um den Landwirten genügend Fläche zur Bewirtschaftung bieten zu können.

Es wäre verfrüht, die nunmehr erarbeiteten Daten auf eine höhere Integrationsebene zu heben und Hochrechnungen durchzuführen. Dennoch ist der gewonnene Datensatz wertvoll und sehr vielversprechend. In den Folgekampagnen werden wir zusätzlich im Biosphärenreservat Ducke (Reserva Florestal Adolpho Ducke) bei Manaus eine ungestörte Primärwaldlokation als Referenzstandort integrieren können.

### Danksagungen

Neben dem Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ), dem Brasilianischen Bildungsministerium, dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und dem brasilianischen Äquivalent CAPES, sowie der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), die das Projekt EcoRespira-Amazon finanziell im Rahmen des Programmes NoPa2 unterstützen, gilt der Dank vor allem der großartigen Studentin Laura Medeiros Braga, ohne deren engagierten Einsatz die neuen Daten aus dem Amazonasbecken nicht in dem Umfang existierten. Zugleich ist unseren Projektpartnern, der brasilianischen Agrar- und Bodenbehörde Embrapa und ihren verlässlichen Mitarbeitern, hier vor allem Gilvan Coimbra Martins, Ednilson Alves Figueiredo und Professor Dr. Celso Paulo de Azevedo sowie der Amazonasschutzbehörde IPAAM und hier vor allem Kikue Muroya ganz herzlich zu danken. Ohne deren Unterstützung gäbe es das Projekt nicht. Abschließend ein großer Dank an unser Laborteam mit Heidrun Kodym, Elvira Rüdiger, Thurit Tschöpe und Karin Volkmann, die wieselflink und mit höchster Qualität zusammen mit Thomas Drauschke und der Koordinatorin Sophie von Fromm die ersten Labordaten hervorzaubern konnten und an B.Sc. Lennart Kieschnik für die Karte (Abb. 1).

### Literatur

- Lewis, S. L.; Brando, P. M.; Phillips, O. L.; van der Heijden, G. M. F.; Nepstad, D. (2011): The 2010 Amazon drought. *Science* 331; doi 10.1126/science.1200807
- Oertel, C.; Börner, E.; Kempe, H.; Matschullat, J. (2015) Kammersystem für die Analyse von Gasflüssen von Ökosystemen. Patent Offenlegungsschrift DE 10 2014 000 816 A1 2015. 07.23
- Oertel, C.; Matschullat, J.; Zurba, K.; Zimmermann, F.; Erasmí, S. (2016): Greenhouse gas emissions from soils – a review. *Chem Erde – Geochem* doi 10.1016/j.chemer.2016.04.002
- Phillips, O. L. (und 65 Koautoren) (2009): Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* 323, 1344; doi 10.1126/science.1164033
- Pumpanen, J.; Longdoz, B.; Kutsch, W. L. (2012) Field measurements of soil respiration: principles and constraints, potentials and limitations of different methods. In: Kutsch, W. L.; Bahn, M.; Heinemeyer, A. (Hg): *Soil carbon dynamics. An integrated methodology*. Cambridge University Press
- Reimann, C.; Birke, M.; Demetriades, A.; Filzmoser, P.; O'Connor, P. (eds.) (2016): *Chemistry of Europe's agricultural soils*. Digitale Aktualisierung von *Geol Jahrb B* 102, 523 S.