



GLOBALER WANDEL

■ STEFFEN KOLB

# Warum verschwindet das Treibhausgas Methan im Waldboden?

BEDEUTUNG VON BAKTERIEN  
FÜR DAS KLIMA

■ Mitteleuropäische Wälder sind global bedeutsame Methansenken (Höglwald, Bayern. Foto: S. Kolb)

**M**ethan ist nach Kohlendioxid das wichtigste Treibhausgas. Jedes Jahr werden 600 Millionen Tonnen in die Atmosphäre abgegeben<sup>3</sup>. Dabei stammt das meiste Methan aus Quellen, die durch den Menschen bedingt werden (z. B. Reisfelder, Viehhaltung, Moore). In all diesen Systemen entsteht Methan beim letzten Schritt des sauerstofffreien Abbaus toter Organismen oder anderen organischen Materials (Methanogenese)<sup>3</sup>. Der Großteil des jährlich freigesetzten Methans wird photochemisch in der Atmosphäre und durch methan-fressende (wissenschaftlich: „methanotrophe“) Bakterien in Böden wieder abgebaut, was zur Folge hat, dass die Konzentration in der Atmosphäre nur langsam ansteigt<sup>3,4</sup>. Derzeit liegt sie bei 0,0002 %<sup>3</sup>. Diese scheinbar geringe Konzentration hat dennoch einen großen Effekt. Methan trägt mit 20 % zur globalen Erderwärmung bei<sup>3</sup>, weshalb ein quantitatives und umfassendes Verständnis des natürlichen Methanverbrauchs und seiner Ursachen essentiell ist, um in Zukunft besser auf die menschenverursachte Erderwärmung reagieren zu können.

Methanotrophe Bakterien erfüllen zwei wichtige Funktionen in der Regulation des globalen Methankreislaufs: Sie reduzieren die Freisetzung des Methans aus vorwiegend sauerstofffreien (anoxischen) Ökosystemen wie Meeressedimente, Moore und Reisfelder, indem sie dort entstehendes Methan an der Grenzfläche zur Atmosphäre gleich wieder umsetzen (Abbildung 1). Außerdem sind methanotrophe Bakterien in belüfteten (oxischen) Wald-, Grünland- und Wüstenböden Senken für Methan aus der Atmosphäre. Weil in belüfteten Böden in der Regel aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes kein Methan entstehen kann, sind methanotrophe Bakterien in diesen Böden auf Methan aus der Atmosphäre angewiesen. Gemeinschaften methanotropher Bakterien in Waldböden unserer gemäßigten Klimate stellen die mit Abstand größten Senken weltweit dar (Abbildung 1).

#### LEBENSWEISE DER METHANOTROPHEN BAKTERIEN IN WALDBÖDEN

Schon zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurden Bakterien entdeckt, die hauptsächlich



#### PD Dr. Steffen Kolb

Jahrgang 1974. 1994-2000 Studium der Biologie (Universität Göttingen); Diplomarbeit (MPI für marine Mikrobiologie, Bremen). 2000-2003 Promotion an der Universität Marburg (Mitarbeiter am MPI für terrestrische Mikrobiologie). 2005-2010 Habilitation im Fach Mikrobiologie (Universität Bayreuth, UBT). Seit 2010 Dozent am **Lehrstuhl Ökologische Mikrobiologie** (UBT).

Methan als Nahrung nutzen<sup>7</sup>. Ähnlich wie wir Menschen brauchen sie Luftsauerstoff für ihren Energiestoffwechsel. Dagegen können komplexere Organismen, wie Pflanzen und Tiere, Methan nicht als Nahrung nutzen, weil ihnen die entsprechenden Enzyme fehlen. Dies gilt auch für die in Waldböden sehr häufig vorkommenden Pilze<sup>7</sup>. Für die durchlüfteten Böden in Wäldern kann aus heutiger Sicht davon ausgegangen werden, dass anaerobe, methanotrophe Mikroorganismen dort nicht vorkommen und deswegen keine Rolle für die Aufnahme von Methan aus der Atmosphäre spielen.

In Waldböden findet in der Regel keine Methanogenese statt, das heißt das Methan, auf das die aeroben, methanotrophen Bakterien in diesen Böden angewiesen sind, stammt ausschließlich aus der Atmosphäre, ebenso wie der notwendige Sauerstoff<sup>4</sup>. Methanotrophe wachsen nur langsam, da die Energiemenge aus Methan verglichen mit der Energiemenge aus energiereicheren Verbindungen (wie zum Beispiel Zucker) gering ist. In Waldböden werden diese Hungerkünstler auch noch mit einem weiteren Problem konfrontiert. Die Methankonzentration in der Atmosphäre ist so gering, dass ein Überleben aus Sicht der zellulären Energiebereitstellung unwahrscheinlich scheint. Es wird derzeit diskutiert, ob Methanotrophe in Waldböden neben Methan doch andere im Boden auftretende Kohlenstoffverbindungen (z. B. Essigsäure) nutzen können, also eventuell doch

#### DER GROSSTEIL DES JÄHRLICH FREI-GESETZTEN METHANS WIRD DURCH METHAN-FRESSENDE BAKTERIEN IN BÖDEN WIEDER ABGEBAUT

#### WEBLINK

- [www.bayceer.uni-bayreuth.de/mik](http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mik)

INFO

Aerobe methanotrophe Bakterien (z. B. *Methylocytis parvus*) sind mikroskopisch kleine Einzeller (Größe: zwei- bis dreitausendstel Millimeter), die festhaftend an Bodenpartikeln leben. Sie sind auf Methan als Kohlenstoff- und Energiequelle spezialisiert<sup>7</sup>.



Physiologisch gehören Methanotrophe zu den Methylotrophen: Mikroorganismen, die auf Ein-Kohlenstoff(C<sub>1</sub>)-Verbindungen wachsen. Dazu zählen Methan, Methanol, Formaldehyd, Halomethane und schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen mit Methylgruppen. Das Enzym Methan-Monooxygenase oxidiert das bei natürlichen Temperaturen reaktionsträge Methan zu dem reaktionsfreudigeren Methanol und ermöglicht durch weitere Verstoffwechslung sowohl die Bereitstellung von Stoffwechsel-Energie und als auch die Aufnahme von Kohlenstoff in die Zelle zum Wachstum.

Die meisten Methanotrophen können nur C<sub>1</sub>-Verbindungen nutzen – sie sind monocarbotroph. Nur wenige Arten verwerten außer einigen C<sub>1</sub>-Verbindungen auch Ethanol, Essigsäure und andere Karbonsäuren – sie sind polycarbotroph. Polycarbotrophe methanotrophe Bakterien kommen zwar auch in Waldböden vor, können aber keine atmosphärischen Methankonzentrationen nutzen<sup>4</sup> und spielen daher keine Rolle für die Aufnahme von Methan aus der Atmosphäre.

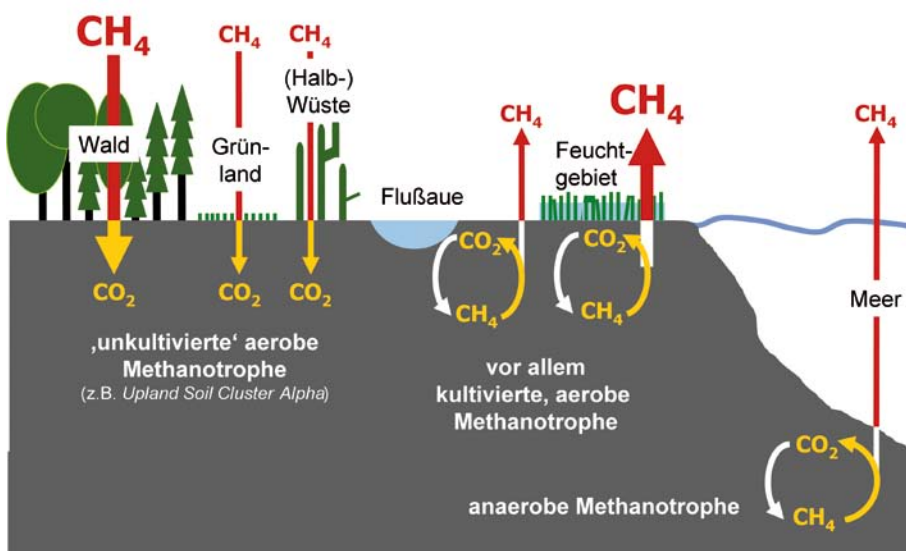


Abb. 1: Rolle der Methanotrophen in Ökosystemen, die Senken oder Quellen von atmosphärischem Methan sind. CH<sub>4</sub>, Methan; CO<sub>2</sub>, Kohlendioxid; gelbe Pfeile, Methanotrophie; weiße Pfeile, Methanogenese. Rote Pfeile, Methanaustausch mit der Atmosphäre. Die Abbildung ist verändert und basiert auf einer bereits veröffentlichten Grafik (Abbildung 3 in<sup>5</sup>; Genehmigung des Autors liegt vor).

polycarbotroph sind. Allerdings sind alle bisherigen Studien uneindeutig<sup>1,4</sup>. Aufgrund ihrer Physiologie findet man methanotrophe Bakterien in Waldböden in einer nur wenige Zentimeter dicken Bodenschicht direkt unter dem Laub. In dieser Schicht sind sie vor Austrocknung geschützt und die lebensnotwendigen Substrate (Methan, Sauerstoff) dringen in ihren Lebensraum vor, was in tieferen Bodenschichten nicht mehr ausreichend der Fall ist (Abbildung 2).

UMWELTEINFLÜSSE, DIE DIE AKTIVITÄT VON METHANOTROPHEN IN WALDBÖDEN STEuern

Lebensgemeinschaften methanotropher Bodenbakterien haben einen entscheidenden Einfluss auf die Fähigkeit eines Ökosystems, Methan aus der Atmosphäre aufzunehmen oder abzugeben. Um ihre Reaktionen auf komplexe Umweltveränderungen (z.B. Rodung eines Waldes) vorherzusagen zu können, ist es nötig, die physiologischen Anforderungen einzelner Arten an ihre Umwelt zu kennen. Bislang ist es noch nicht gelungen, methanotrophe Bakterien aus Waldböden zum Wachstum im Labor anzuregen, so dass sie auch noch nicht durch selektive Anreicherung in Reinkulturen überführt werden konnten. Reinkultur-basierte Untersuchungen sind in der klassischen Mikrobiologie jedoch die Grundlage zur Bestimmung der Anforderungen, die ein Bakterium an seine Umwelt hat. Trotz wiederholter Versuche in verschiedenen Labors weltweit konnten bisher keine methanotrophen Reinkulturen aus Waldböden gewonnen werden, die die atmosphärische Methankonzentrationen nutzen können. Deswegen stützen sich alle bisherigen Forschungsarbeiten zu diesem Thema auf Analysemethoden, die von einer Kultivierung im Labor unabhängig sind<sup>4</sup>. Wie auch in den Arbeiten zu diesem Thema am Lehrstuhl für Ökologische Mikrobiologie der Universität Bayreuth, werden dazu vor allem molekularbiologische Methoden (DNA- und RNA-Analytik) eingesetzt, die es ermöglichen, etwas über die Anzahl, Diversität und Aktivität dieser Organismen in Bodenproben zu erfahren. Diese Daten können dann mit Informationen zur Methanumsetzung in denselben Proben in Beziehung gesetzt werden. So ist es möglich, etwas über die Physiologie der bislang 'unkultivierbaren' Bodenbakterien zu lernen. In den vergangenen zehn Jahren wurden Gemeinschaften methanotropher Bakterien anhand ihrer Gene für die Methan-Monooxygenase untersucht. Die häufigsten Gensequenz-Typen in Böden, die

atmosphärisches Methan aufnehmen, gehören zu ‚unkultivierbaren‘ Arten. In Waldböden ist die Sequenz-Gruppe **Upland Soil Cluster Alpha** vorherrschend<sup>4</sup>. Es handelt sich dabei vermutlich um Arten, die stammesgeschichtlich nah mit den *Beijerinckiaceae* (*Alphaproteobacteria*) verwandt sind. Die Menge Methan, die eine methanotrophe Mikrobengemeinschaft im Boden aufnimmt, ist von der Sauerstoffverfügbarkeit abhängig. Diese wird primär vom Wassergehalt bestimmt. Deswegen kommt es nach einem Regenfall schnell zu einer Sauerstofflimitierung des methanotrophen Stoffwechsels. Das bedeutet, dass Boden-Wassergehalte einen entscheidenden Einfluss auf die Aktivität der methanotrophen Bakterien und damit darauf, wie viel Methan im Waldboden umgesetzt wird<sup>4</sup>. Massive Eingriffe in die Bodenstruktur (z. B. Baumfällarbeiten) durch den Menschen können die Methanaufnahme nachhaltig reduzieren. Die Feinstruktur der oberflächennahen Bodenschicht (Abbildung 2), in der die Methanotrophen leben, wird gestört und viele methanotrophe Zellen sterben ab. Die Wiederherstellung der Zellzahlen und als Folge davon ihrer Aktivität dauert aufgrund des langsamen Wachstums der methanotrophen Bakterien Jahre. Welche Arten in belüfteten Böden vorkommen, ist zumindest teilweise vom pH-Wert bestimmt<sup>4</sup>. Wie andere abiotische Faktoren (z. B. Stickstoffverfügbarkeit) auf die Zusammensetzung der methanotrophen Mikrobengemeinschaften in belüfteten Böden wirken, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Neben abiotischen können auch biologische Faktoren methanotrophe Bakterien beeinflussen. Im Zuge der Wiederaufforstung im 19. Jahrhundert wurden in Zentraleuropa meist Fichten (*Picea abies*) angepflanzt. Fichten produzieren stark riechende ätherische Öle (Monoterpene), die für viele Boden-Mikroorganismen toxisch sind. Monoterpene kommen in Laubbäumen in deutlich geringerer Konzentration vor<sup>6</sup>. Die Bildung von  $\alpha$ -,  $\beta$ -Pinen und Limonen durch Fichten in Nadelwäldern können den Stoffwechsel von Methanotrophen im Boden hemmen und so nachhaltig die Methanaufnahme und die Zellzahl der Methanotrophen im Ver-

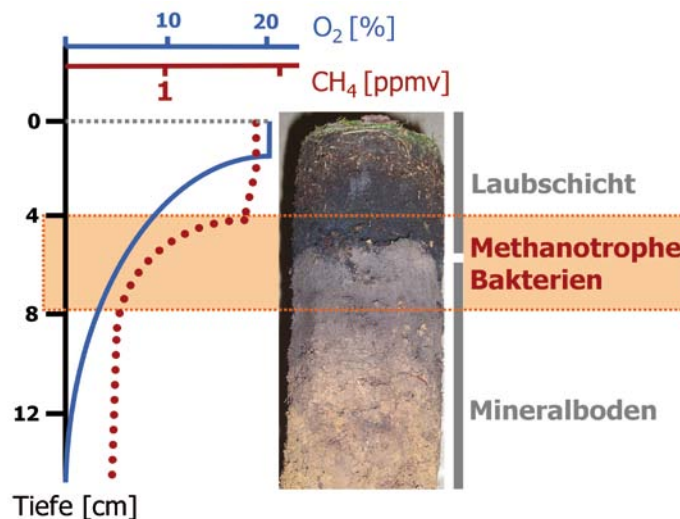


Abb. 2: Lokalisation Methanotropher Bakterien im Waldboden. Orange-markierter Bereich, Großteil der methanotrophen Bakterien und höchste Aktivität (mehr Details dazu in <sup>4</sup>). O<sub>2</sub>, Luftsauerstoff; CH<sub>4</sub>, Methan; ppmv, parts per million (1 ppmv = 0,0001 %). Dargestellter Bodenkern stammt aus einem Fichtenwald (Höglwald, Bayern, Foto aus der Diplomarbeit von S. Gutmann 2008).

gleich zu Laub- oder Mischwäldern reduzieren<sup>1,6</sup>. Grundsätzlich ist mittlerweile ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von bestimmten ‚unkultivierbaren‘ Methanotrophen-Arten und Bäumen nachgewiesen worden. Dies dürfte erklären, warum Waldrodungen und -umwandlung in Agrarland letztlich zur starken Reduzierung oder sogar Verschwinden einer ehemaligen Methansenke führen. Es wird nachwievor diskutiert, wie schnell sich die verschwundenen Methanotrophen als Folge von Aufforstung ehemaliger Waldgebiete sich wieder anreichern lassen (Zeithorizont: von Jahren bis zu einem Jahrhundert). Dennoch gilt es als unbestrittene Tatsache, dass eine Bepflanzung von Agrarland mit Bäumen die Eigenschaft des Bodens als Methansenke wiederherstellt und sich offensichtlich auch wieder ‚unkultivierbare‘, methanotrophe Bakterien anreichern. Um quantitativ bedeutsame und mathematisch modellierbare Vorhersagen zur Reaktion von methanotrophen Gemeinschaften auf komplexe Umweltveränderungen treffen zu können, muss die Physiologie dieser weitestgehend noch nicht kultivierten Mikroorganismen tiefgehend aufgeklärt werden – das heißt es ist noch ein langer Weg bis zum vollständigen Verständnis von terrestrischen Senken für atmosphärisches Methan.

- 1 Degelmann DM, Borken W, Drake HL, Kolb S (2010) Different atmospheric methane-oxidizing communities in European beech and Norway spruce soils. *Appl Environ Microbiol* 76: 3228-3235
- 2 Degelmann DM, Kolb S, Borken W (2010) Methane oxidation kinetics differ in European beech and Norway spruce soils. *Eur J Soil Sciences* 60: 499-506
- 3 Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A, Ciais P, Cox PM, Dickinson RE, et al. (2007) Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., et al. (Hrsg.). Cambridge University Press Cambridge, UK, 499-587.
- 4 Kolb S (2009) The quest for atmospheric methane oxidizers in forest soils. *Environ Microbiol Rep* 1(5): 336-346
- 5 Kolb S (2011) Treibhausgas-vernichtende Mikroben. *BioSpektrum* 2: 146-149
- 6 Maurer D, Kolb S, Haumaier L, Borken W (2008) Inhibition of atmospheric methane oxidation by monoterpenes in Norway spruce and European beech soils. *Soil Biol Biochem* 40: 3014-3020.
- 7 Trotsenko YA, Murrell JC (2008) Metabolic aspects of aerobic obligate methanotrophy. *Adv Appl Microbiol* 63: 183-229.