

Treibhausgasbudget der Arktis

Bildung und Oxidation von Methan in tauendem Permafrost

SUSANNE LIEBNER, JOANNE HESLOP

GFZ DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM, SEKTION GEOMIKROBIOLOGIE, POTSDAM

Permafrost regions store between 1.100 and 1.500 gigatons of organic carbon and account for about 50 % of the world's soil carbon storage. About 10–20 % of near-surface permafrost has been lost due to increases in surface temperatures between 1960 and 2000, and between 10–65 % of near-surface permafrost is expected to disappear by the year 2100. The organic matter in permafrost is only weakly protected and most of it is therefore available for microbial degradation. Microorganisms thus play a central role for the permafrost carbon feedback.

DOI: 10.1007/s12268-022-1746-1
© Die Autorinnen 2022

■ Der auftauende Permafrostboden setzt Kohlenstoff frei in Form von CO_2 und Methan. Dies verstärkt die globale Oberflächenerwärmung. Dieser Zusammenhang wird als Permafrost-Kohlenstoff-Rückkopplung bzw. Permafrost Carbon Feedback (PCF) bezeichnet. Berücksichtigt man die Treibhausgasemissionen, die zusätzlich aus mobilisiertem organischem Kohlenstoff der Permafrostböden entstehen, könnte das bedeuten, dass die zulässigen anthropogenen Emissionsbudgets für fossile Brennstoffe um weitere 25 Prozent reduziert werden müssten, um die Erwärmung bis 2100 auf zwei Grad über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Vorhersagen über den Umsatz von organischem Kohlenstoff im auftauenden Permafrostboden weisen große Schwankungen auf, die von einer Umwandlung von mehr als 90 Prozent dieses Kohlenstoffs in CO_2 innerhalb von vier Jahrzehnten bis zu einer Mobilisierung von nur 15 Prozent oder sogar weniger innerhalb von 100 Jahren reichen. Dies unterstreicht die großen Unsicherheiten, die mit den Prognosen der Kohlenstoffrückkopplung im Permafrost verbunden sind.

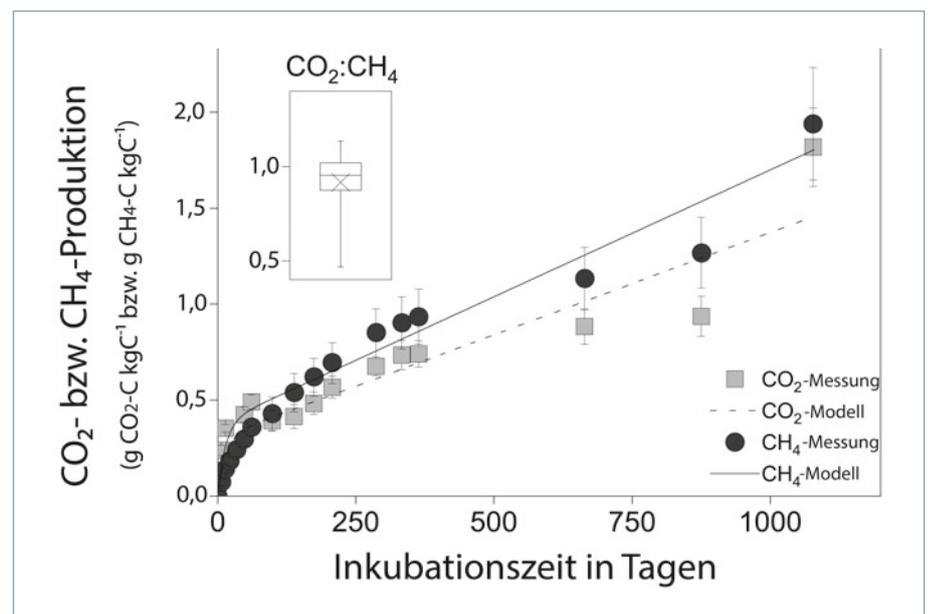
Langfristig deutlich mehr Methan

Eine zentrale Fragestellung der aktuellen Permafrostforschung ist, wie schnell Mikroorganismen die organische Substanz in tauenden Permafrostböden in die Treibhausgase

CO_2 und Methan umsetzen. Methan ist ein wirkungsvolles Treibhausgas mit einem 32fach höheren globalen Erwärmungspotenzial als CO_2 über einen Zeitraum von 100 Jahren. Beide Gase werden in tauenden Per-

mafrostböden gebildet, wenn Mikroorganismen fossile Tier- und Pflanzenreste im Boden zersetzen. Methan entsteht nur, wenn kein Sauerstoff vorhanden ist.

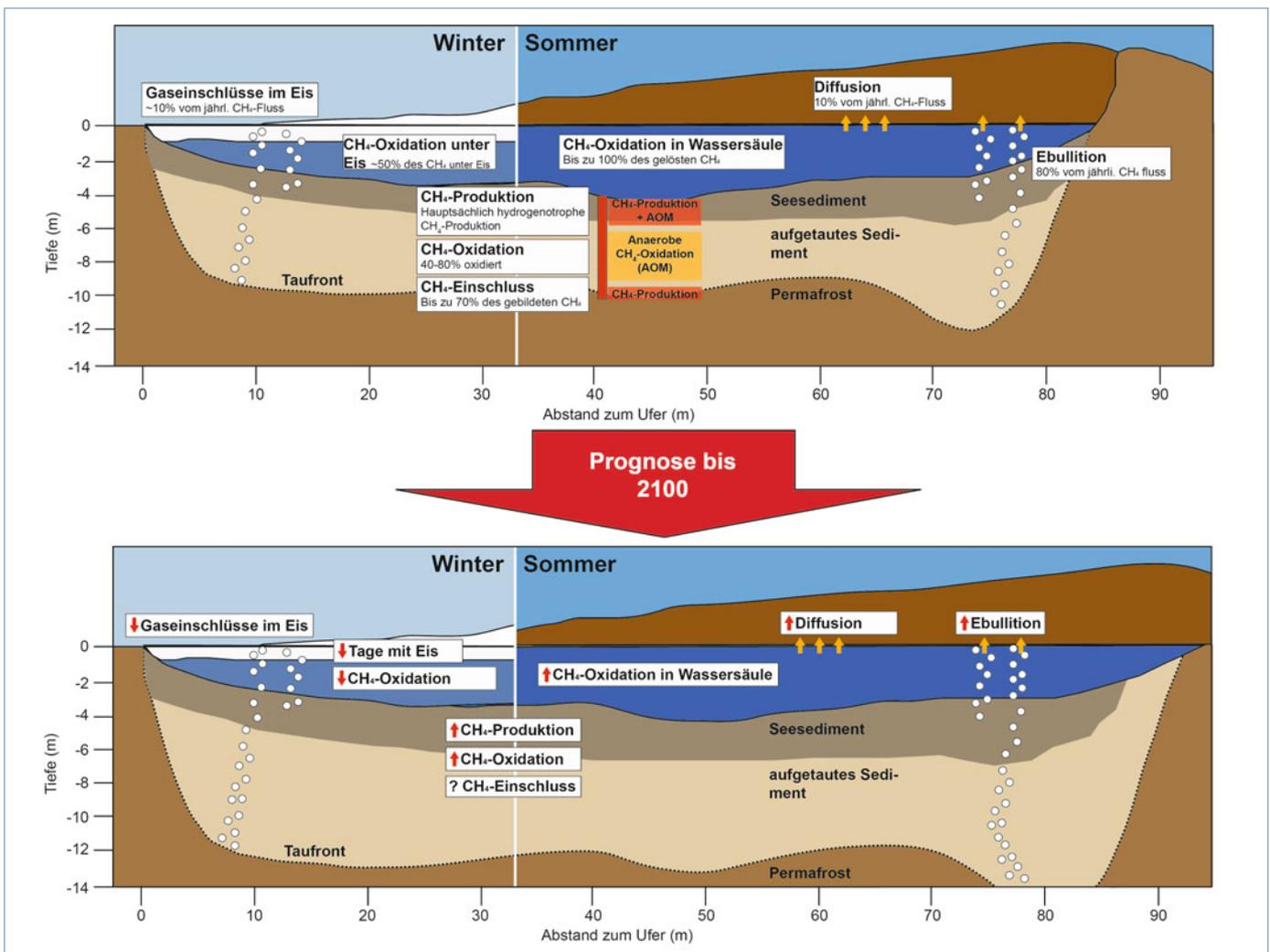
Bisher galt, dass mehr Treibhausgase entstehen, wenn die Böden trocken und belüftet sind, also Sauerstoff verfügbar ist. Selbst unter Ausschluss von Sauerstoff wurde die Bildung von Methan in Laborinkubationen bislang jedoch kaum beobachtet, und den Kohlenstoff des getauten Permafrosts wandeln Mikroben auch hier hauptsächlich in CO_2 um. Vermutlich war der bislang beobachtete geringe Beitrag der Methanproduktion innerhalb der anoxischen Kohlenstoffzersetzung im auftauenden Permafrost auf das Fehlen einer aktiven Gemeinschaft methanbildender Mikroorganismen zurückzuführen. Unserer aktuellen Studie zufolge etabliert sich diese nach dem Tauen von Permafrost nämlich erst über längere Zeiträume [1]. In diesen Laborversuchen maßen und



▲ **Abb. 1:** Exemplarische Übereinstimmung modellierter und gemessener CO_2 - und Methanbildungsdaten auf Basis eines Zwei-Pool-Kohlenstoff-Zeretzungsmodells, das mit Daten aus Langzeitinkubationen kalibriert wurde (modifiziert aus [1]). Die CO_2 - und Methanproduktionsraten basieren auf anoxischen Inkubationen von Permafrostproben aus dem sibirischen Lena-Delta bei 4 °C. Der eingefügte Kasten zeigt das gemessene Verhältnis von $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ als Indikator dafür, dass sich methanbildende Gemeinschaften nach dem Tauen langfristig etabliert haben.



▲ **Abb. 2:** Das methanoxidierende Bakterium *Methylocapsa palsarum* wurde aus einem Palsamoor der Finnmark isoliert [3]. Die Abbildung links zeigt eine Aufnahme von *M. palsarum* mit Rasterelektronenmikroskopie (© Uit, Arktische Universität Tromsø, Foto: Mette Marianne Svenning). *M. palsarum* ist dominanter Vertreter der methanoxidierenden Gemeinschaft in dem Kleingewässer, das sich infolge des Tausens und der Degradation des Palsahügels gebildet hat (Mitte). Für die Kultivierung wurden Torfmoose aus dem Kleingewässer genutzt (rechts).



▲ **Abb. 3:** Gegenwärtige (oben) und zukünftige (unten) Dynamik der Methanflüsse und methanbildenden sowie -oxidierenden Prozesse am Beispiel des Vault Lake, einem typischen Thermokarstsee in Alaska (modifiziert aus [5]). Die Flüsse und Prozesse in der oberen Abbildung beruhen auf Messungen am oder in der Nähe vom Vault Lake, während die Flüsse und Prozesse der unteren Abbildung aus Modellrechnungen und Prognosen hergeleitet sind. Durch die Klimaerwärmung wird es zu verstärktem Tauen und damit einhergehender Erosion kommen, was zu einer Vergrößerung des Sees und/oder des darunter liegenden Taliks (getautes Sediment) oder längerfristig auch zur Austrocknung des Sees führen kann. Darüber hinaus wird erwartet, dass höhere Temperaturen zu einer Abnahme an Tagen mit Eisbedeckung (Eisspeicherblasen) und damit Methanoxidation unter dem Eis führen, während gleichzeitig die Emission durch Blasenbildung und/oder Diffusion und die Methanoxidation in den Sedimenten und der eisfreien Wassersäule zunehmen. Die Nettoauswirkungen auf den jährlichen Methanfluss bleiben ungewiss, obwohl die Literatur nahelegt, dass diese kombinierten Faktoren in einem Anstieg der Methanfreisetzung aus Thermokarstseen bei zunehmender Erwärmung resultieren.

beifertigten wir über mehrere Jahre, wie viel Methan langfristig in tauendem Permafrost gebildet wird. Während wir maximale Produktionsraten von CO₂ sowohl unter oxidischen als auch anoxischen Bedingungen zu Beginn der Inkubationsphase maßen, begann die anoxische Methanproduktion der rund vierzigtausend Jahre alten Proben aus der sibirischen Arktis erst nach einer Verzögerungsphase von teilweise mehreren Jahren.

Wir beobachteten die Entwicklung der anoxischen CO₂- und Methanbildung über sieben Jahre. Es zeigte sich, dass unter Luftabschluss genauso viel Methan produziert werden kann wie CO₂ (**Abb. 1**, Kasten). Die Rolle des Methans im PCF wurde also bislang stark unterschätzt. Der langfristige anoxische Abbau von organischem Material im Permafrost setzt zwar weniger Kohlenstoff frei als beim oxidischen Abbau, jedoch mehr CO₂-Äquivalente, wenn man bedenkt, dass Methan weitaus klimawirksamer ist. Ob Permafrost nach dem Tauen Methan bildet oder nicht, hängt dabei maßgeblich von den Umweltbedingungen vor dem Einfrieren ab [2]. Ursprünglich warme und feuchte Klimabedingungen, die günstig für den Prozess der Methanbildung waren, führen z. B. dazu, dass methanogene Archaeen bevorzugt im Permafrost konserviert wurden. Tauen diese Schichten auf, werden die darin enthaltenen Methanproduzenten wieder aktiv, während ursprünglich kalte und trockene Klimabedingungen häufig mit Ablagerungen verbunden sind, die nach dem Tauen selbst langfristig kein Methan bilden.

Mit den Daten der Langzeitstudie wurden Rechenmodelle verbessert, die abschätzen, wie viel Treibhausgas sich langfristig im Permafrost bildet (**Abb. 1**). Einer ersten Hochrechnung zufolge könnten bis zu einer Gigatonne Methan und 37 Gigatonnen CO₂ aus dem Permafrost Nordeuropas, Nordasiens und Nordamerikas bis zum Jahr 2100 entstehen. Die Prognose enthält aber Unsicherheiten: Wie tief werden die Böden bis dahin tatsächlich auftauen? Werden sie eher trocken oder nass sein? In jedem Fall machen die neuen Daten jetzt genauere Vorhersagen zu den Auswirkungen tauender Permafrostböden auf unser Klima möglich.

Methansenken in Thermokarstseen

Anders als methanbildende Archaeen tragen methanoxidierende (methanotrophe)

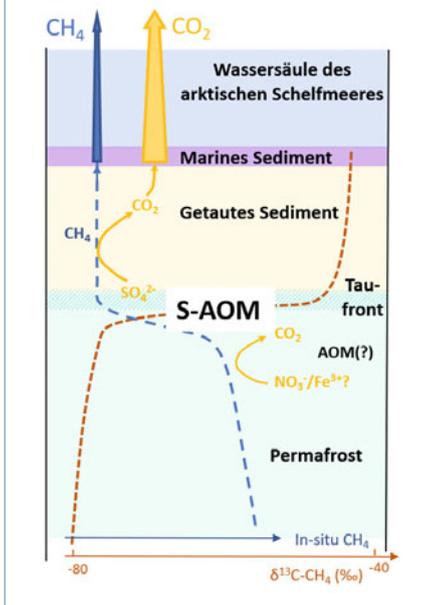
Bakterien und Archaeen maßgeblich dazu bei, die Emissionen von Methan aus Böden der arktischen Tundra zu minimieren. Eine Reihe ökologischer Studien zu methanotrophen Bakterien, die Sauerstoff für den Prozess der Methanoxidation nutzen, dokumentierten in den vergangenen 15 Jahren deren weite Verbreitung in Böden, Seen und Pflanzen der Arktis. Das methanoxidierende Bakterium *Methylocapsa palsarum* (**Abb. 2**, links) beispielsweise wurde aus einem kleinen Thermokarstsee der nordnorwegischen Finnmark isoliert [3], der sich an der Abbruchkante eines tauenden Palsahügels gebildet hat (**Abb. 2**, mittig). Als Palsas werden Erdhügel in Gebieten mit Permafrost bezeichnet, die in Mooren durch einen im Boden befindlichen Kern, bestehend aus eisreichem gefrorenem Torf und Eislinsen, entstehen. Palsas waren in den Regionen der Subarktis einst weit verbreitet, sind jedoch besonders stark vom Klimawandel betroffen und daher zu großen Teilen bereits getaut. Verschwinden sie, bilden sich Tümpel, dicht besiedelt mit Seggen und Torfmoosen (**Abb. 2**, rechts). Bakterien wie *M. palsarum* agieren als wichtige Methansenken in diesen durch hohe Methanproduktion und -emission gekennzeichneten Kleingewässern [4].

Seen, die infolge des Tauens von Permafrost und der damit verbundenen Sackung der Geländeoberfläche entstehen, werden als Thermokarstseen bezeichnet und gelten in der Arktis als Hotspots für die Freisetzung von Methan in die Atmosphäre. Das Methan aus Thermokarstseen stammt dabei aus verschiedenen Quellen, darunter neben jüngeren mikrobiellen auch aus fossilen geologischen Quellen. Diese Emissionen werden jedoch in aktuellen, globalen Klimamodellen nicht berücksichtigt, obwohl sie das PCF in diesem Jahrhundert verdoppeln könnten.

Einer der biogeochemisch und mikrobiologisch am besten untersuchten Thermokarstseen ist der Vault Lake, ein typischer Thermokarstsee im Inneren Alaskas. Auf Grundlage zahlreicher Studien konnten Methanquellen, -senken und -flüsse am Vault Lake exemplarisch budgetiert werden [5]. Demnach gelangen ungefähr 80 Prozent des jährlich freigesetzten Methans durch Ebullition in die Atmosphäre (**Abb. 3**, oben). Ebullition tritt auf, wenn sich hohe Methankonzentrationen im Porenraum des Sediments ansammeln und

Hier steht eine Anzeige.

 Springer



◀ **Abb. 4:** Schematische Darstellung der anaeroben Methanoxidation an der Taufont von submarinem Permafrost. Biogenes Methan ist in eisgebundenem Permafrost des arktischen Schelfs eingeschlossen, wird jedoch im Zuge des Tauens und der sich langsam nach unten bewegenden Taufont freigesetzt. Das freigesetzte Methan wird an der Taufont durch sulfatgetriebene, anaerobe Methanoxidation (AOM) jedoch wieder zu CO_2 oxidiert und gelangt daher nicht oder kaum über das getaute Sediment in die Wassersäule und Atmosphäre. Biogeochemische und molekulare Daten der Taufont geben zudem Anhaltspunkte, dass AOM hier auch mit oxidiertem Eisen oder Nitrat stattfinden könnte. Die sehr tief im Sediment liegende Zone der sulfatgetriebenen AOM-Aktivität ist vermutlich durch geringe Sulfatreduktionsraten im marinen, oberflächennahen Sediment möglich, die ihrerseits vermutlich auf niedrige Kohlenstoffgehalte und auf starke physikalische Durchmischungsprozesse im Sediment zurückzuführen sind.

Gasblasen bilden. Diese Blasen können dann durch Kanäle im Sediment wandern und in die Atmosphäre gelangen. Im Winter schließt das Oberflächeneis des Sees viele der Methanblasen ein. Wenn das Eis im Frühjahr schmilzt, wird das eingeschlossene Methan durch einen Prozess, der als Eisblasenspeicherfluss bezeichnet wird, in die Atmosphäre freigesetzt. Dieser Fluss macht ungefähr zehn Prozent der jährlichen Emission aus. Bei eisfreien Bedingungen, wenn das Seewasser mit Methan übersättigt ist, wird das Methan auch über Diffusion transportiert. So gelangen weitere zehn Prozent des jährlich emittierten Methans in die Atmosphäre.

Sowohl Modellstudien als auch Feldbeobachtungen deuten darauf hin, dass Thermokarstseen deutlich mehr Methan in ihren Sedimenten produzieren als in die Atmosphäre abgegeben wird. Dieses überschüssige Methan sammelt sich entweder an und wird in den Sedimenten gespeichert oder wird oxidiert, bevor es in die Atmosphäre abgegeben wird. Je nach den örtlichen Bedingungen wird 50–100 Prozent des in Thermokarstseen produzierten Methans in den Sedimenten und der Wassersäule oxidiert. Hierzu sind in den letzten Jahren Studien mit überraschenden Ergebnissen erschienen, die darauf hindeuten, dass Methan in Thermokarstseen möglicherweise auch in Abwesenheit von Sauerstoff oxidiert werden kann [6, 7].

Dieser Prozess der anaeroben Methanoxidation (AOM) wurde bislang vor allem in marinen Sedimenten untersucht, wo Sulfat als Elektronenakzeptor fungiert. Sulfatgetriebene AOM wurde auch an der Taufont von submarinem Permafrost des sibirischen arktischen Schelfmeeres beobachtet (Abb. 4,

[8, 9]). Wie relevant AOM in Sedimenten von Thermokarstseen generell ist, wissen wir jedoch noch nicht. Wahrscheinlich werden im Zuge einer weiteren Klimaerwärmung sowohl die Methanproduktion als auch die Methanoxidation am Vault Lake und anderen Thermokarstseen zunehmen (Abb. 3, unten).

Mehr Methanproduktion als -oxidation?

Wir vermuten, dass die Zunahme der Methanproduktion die Zunahme der Methanoxidation übersteigen wird. Kürzere Eisbedeckungszeiten in Thermokarstseen aufgrund der Erwärmung und der zunehmenden Schneedicke werden voraussichtlich dazu führen, dass mehr Methan über Ebullition und Diffusion in die Atmosphäre gelangt. Wie sich diese unterschiedlichen Kontrollmechanismen auf die Nettoemissionen von Methan aus arktischen Seen im Zuge der Erwärmung auswirken werden, ist eine Frage für künftige Studien. ■

Literatur

- [1] Knoblauch C, Beer C, Liebner S et al. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost. *Nature Climate Change* 8: 309–312
- [2] Holm S, Walz J, Horn F et al. (2020) Methanogenic response to long-term permafrost thaw is determined by paleoenvironment. *FEMS Microbiology Ecology* 96: fiae021
- [3] Dedysh SN, Didriksen A, Danilova O et al. (2015) *Methylocapsa palsarum* sp. nov., a methanotroph isolated from a subArctic discontinuous permafrost ecosystem. *Int J Syst Evol Microbiol* 65: 3618–3624

- [4] Liebner S, Ganzert L, Kiss A et al. (2015) Shifts in methanogenic community composition and methane fluxes along the degradation of discontinuous permafrost. *Front Microbiol* 6: 356
- [5] Heslop JK, Walter Anthony K, Winkel M et al. (2020) A synthesis of methane dynamics in thermokarst lake environments. *Earth-Science Rev* 210: 103365
- [6] Winkel M, Mitzscherling J, Overduin P et al. (2019) First evidence for cold-adapted anaerobic oxidation of methane in deep sediments of thermokarst lakes. *Environ Res Commun* 1: 021002
- [7] in 't Zandt MH, Liebner S, and Welte CU (2020) Roles of thermokarst lakes in a warming world. *Trends Microbiol* 28: 769–779
- [8] Overduin PP, Liebner S, Knoblauch C. et al. (2015) Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole. *J Geophys Res Biogeosci* 120: 502–512
- [9] Winkel M, Mitzscherling J, Overduin P et al. (2018) Anaerobic methanotrophic communities thrive in deep submarine permafrost. *Sci Rep* 8: 1291

Funding note: Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.
Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Susanne Liebner
 Sektion Geomikrobiologie
 Helmholtz Zentrum Potsdam
 GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum
 Telegrafenberg A71
 D-14473 Potsdam
susanne.liebner@gfz-potsdam.de
www.gfz-potsdam.de/mitarbeiter/susanne-liebner
<https://orcid.org/0000-0002-9389-7093>

AUTORINNEN



Susanne Liebner

Studium Geoökologie an der Universität Potsdam, M. Sc. in Mariner Mikrobiologie in Bremen. 2008 Promotion am Alfred-Wegener-Institut, Potsdam. 2008–2012 Postdoc an der ETH Zürich, Schweiz, und der Universität Tromsø, Norwegen. 2013–2019 Gruppenleiterin einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe und 2014–2020 Juniorprofessorin an der Universität Potsdam, gemeinsam berufen mit dem dortigen GeoForschungs-Zentrum (GFZ). Seit 2020 W2-Professorin für terrestrische Umweltmikrobiologie.



Joanne Heslop

2008–2011 Studium der Biogeochemie an der University of Nevada in Reno, USA. 2017 PhD in Geophysik an der University of Alaska in Fairbanks zur Methanproduktion in Permafrostgebieten. 2017–2019 Postdoc an der Queen's Universität in Kingston, Kanada. Seit 2019 Discovery Fellow am GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam.