

VOM WERT BIOLOGISCHER VIELFALT

Grenzen des Lebens kennen. Das größte Ökosystem der Erde: die Tiefe Biosphäre

AutorInnen: Dr. Jens Kallmeyer, Jun. Prof. Dr. Susanne Liebner, Prof. Dr. Dirk Wagner
(Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

Seit den Anfängen ihrer Erforschung vor fast 100 Jahren hat die Tiefe Biosphäre in den letzten drei Jahrzehnten einen großen Aufschwung erlebt und sich zu einer wichtigen Forschungsrichtung entwickelt. Der tiefe Untergrund wird zunehmend stärker industriell genutzt. Die Entscheidungen über Nutzungskonzepte verlangen nach einem profunden Verständnis der dort ablaufenden Prozesse, das in vielen Fällen noch nicht vorhanden ist.

- Der tiefe Untergrund ist auch eine Biosphäre, die zunehmend industriell genutzt und auch erforscht wird.
- Neben der Erforschung von Prozessen werden am Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) bisher unbekannte Mikroorganismen aus der Tiefen Biosphäre kultiviert und molekularbiologisch untersucht.
- Diese Organismen erlauben es, die Anpassung an die speziellen Umweltbedingungen der Tiefen Biosphäre zu studieren und bisher unbekannte Biomoleküle zu identifizieren.

Was ist die Tiefe Biosphäre? Warum ist es sinnvoll mehr darüber zu erfahren? Für die meisten Menschen bedeutet „Biosphäre“ das Leben auf der Erde. Sie übersehen dabei, dass es auch eine Biosphäre tief in der Erde gibt, die sogenannte „Tiefe Biosphäre“. Die Tiefe Biosphäre stellt das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde dar. Die Porenräume in Sedimenten sowie Klüfte und Spalten im Festgestein durchziehen die gesamte Erdkruste mit einem kontinuierlichen zusammenhängenden Netzwerk.

Über den Anteil der Bewohner der Tiefen Biosphäre an der gesamten lebenden Biomasse auf der Erde gibt es verschiedene Schätzungen, die aufgrund der zum Teil spärlichen Datenlage mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Im Allgemeinen wird angenommen, dass bis zu 20 Prozent des in lebenden Organismen gespeicherten Kohlenstoffs in der Tiefen Biosphäre steckt (Kallmeyer et al., 2012).

Die Anzahl der Mikroorganismen in Sedimenten nimmt mit zunehmender Tiefe exponentiell ab. Zum Beispiel sind aufgrund der geringen Sedimentationsraten im Zentralpazifik die Sedimente in 7 Metern Tiefe bereits mehrere Millionen Jahren alt. Das bedeutet, dass die dort vorkommenden Mikroorganismen seit Millionen von Jahren von einer Versorgung mit frischen Nährstoffen der Oberfläche abgeschnitten sind.

Daraus folgerten die bekannten Mikrobiologen Morita und ZoBell bereits in den 1950er Jahren, dass die wenigen Reste organischen Materials, die in dieser Tiefe noch vorhanden sind, ausreichen, um den Organismen das Überleben zu sichern. Eventuell nutzen sie auch alternative Energiequellen wie z.B. Wasserstoff, der durch Zerfall von radioaktiven Elementen, die überall auf der Erde in sehr geringen Konzentrationen vorhanden sind, freigesetzt wird. Trotz großer Fortschritte in der Erforschung der Tiefen Biosphäre sind die damals aufgeworfenen Fragen bis heute nicht vollständig beantwortet.

Langsames Leben in der Tiefen Biosphäre

Nicht nur die räumliche Ausdehnung und damit verbundene Verschiedenartigkeit der Tiefen Biosphäre stellt die Wissenschaft vor ein Problem. Im Vergleich zum Leben an der Oberfläche läuft das Leben in der Tiefe in extrem vermindelter Geschwindigkeit ab. Zum einen haben die im Untergrund lebenden Mikroorganismen einen deutlich langsameren Stoffwechsel. Zum anderen gibt es viel weniger Zellen.

Um das Leben und die Prozesse im tiefen Untergrund untersuchen und Daten für Modelle liefern zu können, ist die Gewinnung von Proben durch Tiefbohrungen unabkömmlich. Wissenschaftlich beschäftigen sich zwei internationale Programme mit der Erforschung des tiefen Untergrunds durch Bohrungen, das landbasierte Internationale Kontinentale Bohrprogramm (International Continental Drilling Program, ICDP), das am Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) koordiniert wird, und das Tiefseebohrprogramm International Ocean Discovery Program (IODP), das schon diverse Vorgänger Programme hatte (DSDP, ODP) und nun seit über 40 Jahren kontinuierlich betrieben wird. Es handelt sich dabei um eines der weltweit ältesten internationalen Forschungsprojekte. Näheres zum Thema Bohren für die Erkundung der Tiefen Biosphäre kann im GFZ-Journal „System Erde“ (systemerde.gfz-potsdam.de) in der Ausgabe „Wissenschaftliches Bohren“ nachgelesen werden.

Wo sind Grenzen des Lebens?

Bislang kennen wir nur für die Temperatur die absolute Grenze des Lebens. Sie liegt bei ungefähr 122 °C. Solche extrem hitzetoleranten Organismen werden auch als Hyperthermophile bezeichnet. Man findet diese Organismen in heißen Quellen an mittelozeanischen Rücken in der Tiefsee, den sogenannten Schwarzen Rauchern.

In welcher Tiefe unter der Erde diese Temperatur erreicht wird, hängt vom Temperaturanstieg mit der Tiefe zusammen. Der sogenannte geothermische Gradient schwankt stark zwischen verschiedenen Standorten. Im Durchschnitt liegt er bei ca. 25–30 °C pro Kilometer. Die Temperaturgrenze des Lebens würde also in etwa vier bis fünf Kilometern Tiefe liegen.

Bisher ist im Meer noch nicht so tief gebohrt worden, jedenfalls nicht im Rahmen von Forschungsbohrungen. Die tiefste bisher durchgeführte marine Forschungsbohrung erreichte eine Maximaltiefe von rund 2,5 km und fand lebende Mikroorganismen über die gesamte erbohrte Tiefe. An Land wurde Leben bis in Tiefen von 3,5 km in extrem tiefen Goldminen in Südafrika gefunden.

Abgesehen von der Temperatur konnte noch für keinen chemischen oder physikalischen Parameter die absolute Grenze des Lebens gefunden werden. Bei Parametern wie Druck oder pH sind wir noch weit davon entfernt, die absoluten Grenzen zu kennen. Im Labor wurden Mikroorganismen bereits Drücken ausgesetzt, die normalerweise in Hunderten von Kilometern Tiefe herrschen. Dabei handelt es sich um Bereiche, in denen die Temperatur auf der Erde auf jeden Fall weit außerhalb des biologischen Bereichs liegt. Zumindest einige Zellen überlebten auch diese Behandlung.

Neben hohen Drücken und Temperaturen zeichnet sich die Tiefe Biosphäre in den meisten Fällen durch extreme Nährstoffarmut aus. Daher ist eine der zentralen Fragen, wie die Organismen unter diesen Bedingungen überleben können und ob es irgendwo auf bzw. in der Erde Bedingungen gibt, wo die Nährstoffversorgung so minimal ist, dass die mikrobielle Population „ausgehungert“ wird. In den nährstoffärmsten Gebieten der Ozeane wird so wenig organisches Material abgelagert, dass nur sehr wenige Mikroorganismen dort überleben können, und das auch nur mit einem stark verlangsamten Stoffwechsel. Die Organismen verbrauchen beim Abbau des organischen Ma-

terials Sauerstoff. Aufgrund der extrem geringen Abbauraten wird auch nur sehr wenig Sauerstoff benötigt, so dass der aus dem Meerwasser ins Sediment diffundierende Sauerstoff teilweise bis in die tiefsten über 100 Millionen Jahre alte Sedimentschichten reicht (D'Hondt et al., 2015). In nährstoffreicheren Sedimenten reicht der Sauerstoff dagegen nur wenige Millimeter ins Sediment.

Warum erforschen wir die Tiefe Biosphäre?

Viele Fragen zur Tiefen Biosphäre bleiben bislang ungelöst oder wurden nur unzureichend beantwortet. Zu den wichtigsten Fragen in der Forschung zur Tiefen Biosphäre gehören:

- Wie verbreitet und divers ist das Leben in der Tiefen Biosphäre und was sind die Grenzen des Lebens?
- Welche stoffwechselbedingte (metabolische) Aktivität und Kapazität hat das Leben in der Tiefen Biosphäre?
- Welche Formen von Kohlenstoff und Energiequellen werden von den Organismen genutzt?
- Welche auf die Entwicklungsgeschichte bezogenen (evolutiven) Anpassungen und Überlebensstrategien haben die Organismen der Tiefen Biosphäre?
- Welche natürlichen Ressourcen entstehen durch biologische Aktivität, bzw. werden durch sie vernichtet?
- Könnten Organismen oder Metaboliten aus der Tiefen Biosphäre in der Biotechnologie verwendet werden?
- Welche Interaktionen gibt es zwischen der Geosphäre und der Tiefen Biosphäre und auf welchen Zeitskalen laufen sie ab? Haben diese Prozesse einen Einfluss auf das Klima?
- Ist die Tiefe Biosphäre ein Modell für die frühe Erde und/oder das Leben auf anderen Planeten?

Am GFZ wird auf dem Gebiet der Tiefen Biosphäre vor allem zu drei Themen geforscht. Diese beinhalten die Tiefe Biosphäre als Modell



Abb. 1: Luftbild der Bohrplattform auf dem „Lake Towuti“. Das Versorgungsschiff wird benötigt um alle 12 Stunden den Wechsel der Mannschaft zu ermöglichen und die erbohrten Kerne an Land zu bringen.

Bild: Jens Kallmeyer / GFZ

der frühen Erde, die Interaktion von Mikroorganismen mit den Ressourcen des Untergrunds und die Bildung und Oxidation klimarelevanter Gase im tiefen Permafrost (insbesondere CO₂ und Methan).

Der „Lake Towuti“: Modell für mikrobielles Leben der frühen Erde

Im Sommer 2015 wurde im Rahmen des internationalen wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) zum ersten Mal überhaupt ein eigener Kern für geomikrobiologische und geochemische Untersuchungen gebohrt. An dieser Bohrkampagne am Lake Towuti in Indonesien (Abb.1) sind insgesamt fünf geochemisch und geomikrobiologisch arbeitende Gruppen beteiligt, darunter auch das Deutsche GeoForschungszentrum (GFZ), welches das mobile Geomikrobiologie-Labor „BugLab“ (Abb.2) zur Verfügung stellte und die Leitung dieses Forschungsbereichs hatte.

Besonders überraschend an den bisherigen Ergebnissen: Das mikrobielle Ökosystem funktioniert völlig anders als bisher angenommen und widerspricht der gängigen Lehrmeinung über den Abbau von organischem Material unter sauerstofffreien Bedingungen. Aufgrund der besonderen chemischen Zusammensetzung des Wassers und seiner Sedimente, vor allem

wegen der sehr hohen Eisengehalte, gilt der Lake Towuti als das moderne Äquivalent des Ozeans vor ca. zwei bis drei Milliarden Jahren. Die durch die Bohrung gewonnenen Erkenntnisse erlauben daher auch Rückschlüsse auf Prozesse aus der Frühzeit der Erde. In dieser Zeit bildeten sich die größten bekannten Eisenlagerstätten, die sogenannten Banded Iron Formations (BIFs). Die Mechanismen, die zur Bildung dieser Lagerstätten führten, sind immer noch nicht vollständig geklärt. Es wird vermutet, dass die Bildung der BIFs mit einem schrittweisen Anstieg der Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre und in den Ozeanen, verbunden mit einer Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Ozeanwassers zusammenhängt. Die Bohrkerne vom Lake Towuti können in dieser Hinsicht wichtige Informationen liefern.

Mikroorganismen und die Beschaffenheit von Endlagern

Seit 2018 arbeitet das GFZ an einem Projekt zur Erforschung potentieller Standorte zur Endlagerung von radioaktivem Abfall im Untergrund. Das Projekt namens iCross (Integrität von Endlagersystemen für radioaktive Abfälle – Skalenübergreifendes Systemverständnis und Systemanalyse) ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt, das die Forschungskompetenzen mehrerer Helmholtz-Zentren verbindet. Dazu zählen die Bereiche Kernenergie, Geowissenschaften, Biowissenschaften oder Umweltsimulationen.

Es sollen auf nano- bis regionalen Skalen essentielle experimentelle Daten und Parameter erhoben und fortschrittliche Modellierungstools entwickelt werden, um potentielle Entwicklungen in Endlagern umfassend zu simulieren. Dort können mikrobielle Prozesse zu Gasbildung und -oxidation und damit zu Druckveränderungen führen. Zudem können sie Korrosion, die Bildung von Biofilmen, eine Auflösung und Mineralisierung des Tongesteins sowie die Migration von Radionukliden durch Anlagerung an die Zellen zur Folge haben. Dies

kann letztlich zur Veränderung und Durchlässigkeit des Puffermaterials führen, das als Dichtungsmaterial für ein mögliches Endlager verwendet wird, um es u.a. vor eindringendem Wasser zu schützen. Beispielsweise wird hier der natürliche Füllstoff Bentonit geprüft. Unter Anwendung molekularer und klassischer Methoden der Mikrobiologie werden daher mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse im Wirtsgestein und dem Füllmaterial charakterisiert, um zu verstehen, welchen konkreten Einfluss Mikroorganismen auf die Sicherheit und Durchlässigkeit der einzelnen Barrieren haben.

Die Validierung der Parameter erfolgt in speziellen Experimenten teilweise in großräumigen Untergrund-Forschungslaboren. Der Fokus liegt dabei auf dem Felslabor Mont Terri in der Schweiz, wo kürzlich unter Beteiligung deutscher Partner ein neuer Versuchstunnel ausgeschachtet wurde. Neben anderen Helmholtz-Zentren (UFZ, FZJ, HZDR und KIT) beteiligt sich das GFZ mit fünf Gruppen in der Geophysik, Geomechanik, mit mechanischen Simulationen und geochemischen Modellierungen sowie der Geomikrobiologie.

Mikroorganismen als „Deckel“ für Klimagase aus tiefem Permafrost

Die geomikrobiologischen Arbeiten am GFZ beschäftigen sich auch mit dem Einfluss der Tiefen Biosphäre auf das Klima. Seit dem Anstieg des Meeresspiegels am Ende der letzten Eiszeit liegen ungefähr drei Millionen Quadratkilometer des arktischen Permafrostgebietes heute unter Wasser, vor allem als sogenannter submariner Permafrost auf dem Sibirischen Arktischen Schelf.

In der Tiefe tauender submariner Permafrost gilt als bedeutende Quelle des hochwirksamen Treibhausgases Methan (CH₄) und damit als ein Verstärker der globalen Erwärmung. Zusammen mit WissenschaftlerInnen des Alfred-Wegener-Institutes für Polar- und Meeresforschung (AWI), der Universität Hamburg und des Mel'nikov Permafrostinstituts Jakutsk in Russ-



Abb. 3: Bohrcamp an der Küste der Laptewsee. In Kooperation zwischen dem Alfred-Wegener-Institut (AWI), dem Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) und russischen Kollegen zum Beispiel aus Novosibirsk und Jakutsk wurden im April 2017 subaquatische Permafrost-sedimente gewonnen, um daran u.a. mikrobiologische Studien durchzuführen. Bild: Jan Axel Kitte / GFZ

land wurden im Rahmen der HGF-Nachwuchsgruppe MicroCene (HGF = Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren) Sedimentkerne vom sibirischen Kontinentalhang in der südlichen Laptewsee mikrobiologisch und biogeochemisch untersucht (Abb. 3). Die Laptewsee liegt am Rande des Nordpolarmeers nördlich von Russland. Dort befinden große Gebiete mit untermeerischen (submarinen) Permafrostböden.

Die Forschungsarbeit konnte zeigen, dass das aus dem tauenden Permafrost freiwerdende Methangas von – an der Taugrenze angesiedelten – Mikroorganismen verzehrt wird, noch bevor es in das darüber liegende Sediment gelangen kann (Overduin et al., 2015; Winkel et al., 2018). Dies verhindert, dass Methan in erheblicher Menge in das Meer oder die Atmosphäre freigesetzt wird. Zukünftige Forschung muss zeigen, wie relevant dieser Prozess in tauendem Permafrost insgesamt ist und die dafür verantwortlichen Mikroorganismen im Detail untersuchen.

Quellen

- Bischoff, J., Mangelsdorf, K., Gattinger, A., Schloter, M., Kurchatova, A. N., Herzsuh, U. & Wagner, D. (2013). Response of methanogenic archaea to Late Pleistocene and Holocene climate changes in the Siberian Arctic. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 305-317. doi:10.1029/2011GB004238
- D'Hondt, S., Inagaki, F., Zarikian, C. A., Abrams, L. J., Dubois, N., Engelhardt, T., ... Ziebis, W. (2015). Presence of oxygen and aerobic communities from sea floor to basement in deep-sea sediments. *Nature Geoscience*, 8, 299-304. doi:10.1038/ngeo2387
- Fry, J. C., Horsfield, B., Sykes, R., Cragg, B. A., Heywood, C., Kim, G. T., Mangelsdorf, K., Mildenhall, D. C., Rinna, J., Vieth, A., Zink, K. G., Sass, H., Weightman, A. J. & Parkes, R. J. (2009). Prokaryotic Populations and Activities in an Interbedded Coal Deposit, Including a Previously Deeply Buried Section (1.6-2.3 km) Above 150 Ma Basement Rock. *Geomicrobiology Journal*, 26(3), 163-178. doi:10.1080/01490450902724832
- Glombitza, C., Stockhecke, M., Schubert, C. J., Vetter, A. & Kallmeyer, J. (2013). Sulfate reduction controlled by organic matter availability in deep sediment cores from the saline, alkaline Lake Van (Eastern Anatolia, Turkey). *Frontiers in Microbiology*, 4. doi:10.3389/fmicb.2013.00209
- Horsfield, B., Schenk, H.-J., Zink, K., Ondrak, R., Dieckmann, V., Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., Di Primio, R., Wilkes, H., Parkes, R. J. & Fry, J. C. (2006). Living microbial ecosystems within the active zone of catagenesis: Implications for feeding the deep biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(1-2), 55-69. doi:10.1016/j.epsl.2006.03.040
- Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C. & D'Hondt, S. (2012). Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40), 16213-16216. doi:10.1073/pnas.1203849109
- Lippmann, J., Stute, M., Torgersen, T., Moser, D. P., Hall, J. A., Lin, L., Borcsik, M., Bellamy, R. E. S. & Onstott, T. C. (2003). Dating ultra-deep mine waters with noble gases and Cl-36, Witwatersrand Basin, South Africa. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 67(23), 4597-4619. doi:10.1016/S0016-7037(03)00414-9
- Mangelsdorf, K., Haberer, R. M., Zink, K.-G., Dieckmann, V., Wilkes, H. & Horsfield, B. (2005). Molecular indicators for the occurrence of deep microbial communities at the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas-hydrate production research well. In S. R. Dallimore & T. S. Collett (Hrsg.), *Scientifique Results from Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada* (Geological Survey of Canada, Bulletin 585, S. 1-11). Ottawa: Natural Resources Canada. doi:10.4095/220702
- Mangelsdorf, K., Zink, K.-G., di Primio, R. & Horsfield, B. (2011). Microbial lipid markers within and adjacent to Challenger Mound in the Belgica carbonate mound province, Porcupine Basin, offshore Ireland (IODP Expedition 307). *Marine Geology*, 282(1-2), 91-101. doi:10.1016/j.margeo.2010.05.007
- Morita, R. Y., ZoBell, C. E. (1955). Occurrence of bacteria in pelagic sediments collected during the Mid-Pacific Expedition. *Deep-Sea Research*, 3(1), 66-73. doi:10.1016/0146-6313(55)90036-8
- Overduin, P. P., Liebner, S., Knoblauch, C., Günther, F., Wetterich, S., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W. & Grigoriev, M. N. (2015). Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120:2014JG002862. doi:10.1002/2014JG002862
- Wandrey, M., Morozova, D., Zettlitzer, M., Würdemann, H. & CO2SINK Group. (2010). Assessing drilling mud and technical fluid contamination in rock core and brine samples intended for microbiological monitoring at the CO2 storage site in Ketzin using fluorescent dye tracers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(6), 972-980. doi:10.1016/j.ijggc.2010.05.012
- Winkel, M., Mitzscherling, J., Overduin, P. P., Horn, F., Winterfeld, M., Rijkers, R., Grigoriev, M. N., Knoblauch, C., Mangelsdorf, K., Wagner, D. & Liebner, S. (2018). Anaerobic methanotrophic communities thrive in deep submarine permafrost. *Scientific Reports*, 8:1291. doi:10.1038/s41598-018-19505-9

Impressum

Herausgeber

Helmholtz-Zentrum Potsdam,
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion

PD Dr. Dierk Spreen
Jana Kandarr
Oliver Jorzik

Layout

Pia Klinghammer

E-Mail: redaktion-eskp@gfz-potsdam.de

Alle Artikel sind auch im Internet abrufbar:

<https://themenspezial.eskp.de/biodiversitaet-im-meer-und-an-land/inhalt-937146/>

Stand: Februar 2020

Heft-DOI: <https://doi.org/10.2312/eskp.2020.1>

ISBN: 978-3-98-16597-4-0

Zitiervorschlag:

Earth System Knowledge Platform (Hrsg.). (2020). *ESKP-Themenspezial Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt*. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.1

Einzelartikel:

[Autor*innen]. (2020). [Beitragstitel]. In Earth System Knowledge Platform (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt* ([Seitenzahlen]). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:[DOI]

Die Verantwortung für die Inhalte der Einzelbeiträge der vorliegenden Publikation liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen:
eskp.de | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)