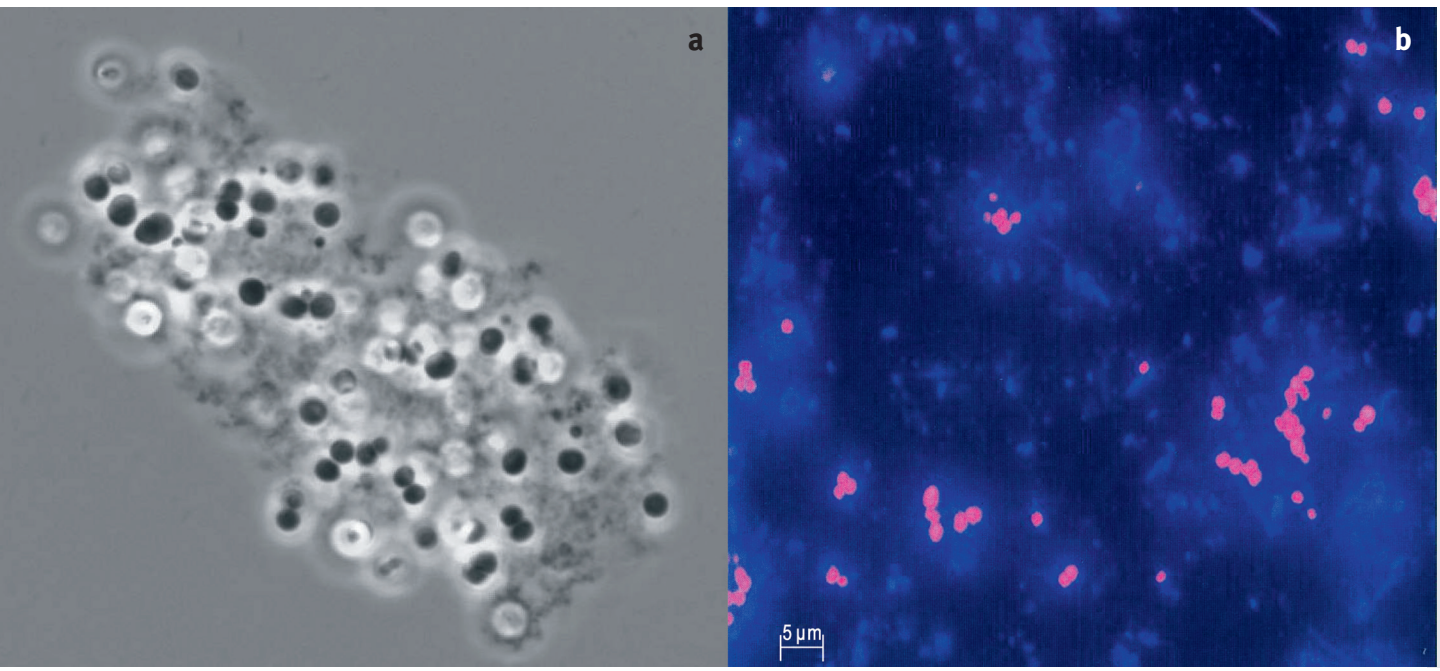
Tiefe Biosphäre: Leben im Untergrund

Dirk Wagner, Janine Görsch, Jens Kallmeyer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Over the past two decades, our concept about the distribution of life on Earth has fundamentally changed. Microorganisms (bacteria and archaea) colonize not only the upper soil layers, but the underlying sediments and rocks as well. Previous estimates assumed that up to 94 % of all microorganisms live in deep subsurface sediments, but recent findings show that microbial abundance in the marine subsurface is much lower than previously estimated. However, these deeply buried communities are as important as the surface biosphere for driving carbon and nutrient cycling and catalyzing a multitude of reactions between rocks, sediments, and fluids. Due to their low abundance and low metabolic rates, studies of deep biosphere microorganisms require special analytical procedures. Therefore we developed an integrated research strategy, which connects geochemical measurements of sediment properties with microbiological/molecular biological analyses of microbial communities and modeling of microbial pathways/networks. Our ongoing studies in sediments of the El'gygytgyn Crater Lake and of the South Pacific Gyre show the importance of microorganisms for the element cycles in these extreme environments. The composition of microbial communities, their role in major biogeochemical cycles and their response to changing environmental conditions, however, are still largely unknown. The future research of the German Centre for Geosciences GFZ will extend our knowledge on the role of microorganisms mainly in continental deposits, especially their impact on biogeochemical cycles, mineral weathering as well as on the quality and stability of reservoirs in the broadest sense.



System Erde (2012) 2, 2 | DOI: 10.2312/GFZ.syserde.02.02.1

Im Lauf der letzten zwei Jahrzehnte hat sich unsere Sicht der Verbreitung des Lebens auf der Erde grundlegend gewandelt. Mikrobiologische Studien der letzten Jahre zeigen, dass nicht nur die Böden als oberste dünne Schicht der Erde besiedelt sind, sondern dass auch die darunter liegenden Sedimente und Gesteine bis tief in die Erdkruste hinein von gewaltigen Mengen an Mikroorganismen (Bakterien und Archaeen) belebt werden. Bisherige Schätzungen gingen davon aus, dass bis zu 94 % aller Mikroorganismen in tiefen Sedimenten unter der Erdoberfläche leben (Whitman et al., 1998). Auch wenn neuere Befunde die Werte für tiefe Meeressedimente nun deutlich nach unten korrigieren, wie unsere Ausführungen zum Südpazifischen Wirbel zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass die unterirdische Biomasse eine ebenso wichtige Rolle für die globalen Stoffkreisläufe spielt wie die oberirdische Biomasse.

Das Ökosystem im tiefen Untergrund, die sogenannte tiefe Biosphäre, spielt eine bedeutende Rolle für die globalen Stoffflüsse sowohl über kurze als auch über lange geologische Zeitskalen. In den letzten Jahren ist das Interesse an der tiefen Biosphäre hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Nutzbarmachung von Ressourcen und anderer Anwendungsaspekte, die durch Mikroorganismen beeinflusst werden, deutlich gestiegen. Hier sind vor allem fossile Energieträger, Erdwärmenutzung, seltene Minerale und Metalle sowie die Lagerung von Gasen (z. B. Kohlendioxid oder Wasserstoff) hervorzuheben. Das Leben im Untergrund ist in weiten Teilen durch einen Mangel an Nährstoffen gekennzeichnet. Es gibt keinen Sauerstoff für Atmungsprozesse und kein Sonnenlicht für die photosynthetische Primärproduktion. Mit zunehmender Tiefe steigen außerdem die Temperatur und der Druck. Das Leben der tiefen Biosphäre ist also durch extremophile Mikroorganismen bestimmt, die sich an die jeweiligen Verhältnisse in ihrem Lebensraum angepasst haben. Viele Organismen sind zu einer anaeroben Lebensweise ohne Sauerstoff befähigt und können einfache Verbindungen wie Wasserstoff und Kohlendioxid als Energie- und Kohlenstoffquelle nutzen (Chemolithoautotrophie). Obwohl die Existenz einer lebenden und aktiven mikrobiellen Gemeinschaft sowohl in marinen als auch in kontinentalen Ablagerungen gezeigt werden konnte (Parkes et al., 1994), ist die Struktur und Funktion dieser Populationen bisher weitgehend unbekannt.

Für ein Gesamtverständnis der biogeochemischen Stoffkreisläufe in tiefen sedimentären Ablagerungen ist neben der Kenntnis der beteiligten Mikroorganismen entscheidend, welche Prozesse ablaufen und wie hoch die jeweiligen Umsatzraten sind (Wagner et al., 2007). Die mikrobiellen Prozesse werden dabei wesentlich von den Ökosystembedingungen wie Temperatur, Druck, Substratverfügbarkeit sowie Porosität und Mineralzusammensetzung der Sedimente, aber auch den Interaktionen zwischen Mikroorganismen und dem geologischen Umfeld, bestimmt.

Mit dem Aufbau der neuen Sektion *Geomikrobiologie* am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, in der die Expertise verschiedener Disziplinen wie der Geochemie, der Mikrobiologie und der Molekularbiologie zusammengeführt werden, wird ein wichtiger Beitrag zur Tiefen-Biosphären-Forschung geleistet. Modernste Analyseverfahren sollen Licht in die Geheimnisse des Lebens im Untergrund bringen, um Beiträge zu Fragen, wie beispielsweise der Entwicklung des Lebens unter sich ändernden Umweltbedingungen oder zur Frage der zukünftigen Energieversorgung, liefern zu können.

Methoden

Die Untersuchung der tiefen Biosphäre erfordert aufgrund der geringen Häufigkeit der Mikroorganismen und der geringen Stoffwechselraten spezielle Analyseverfahren (Abb. 1). Am GFZ wird deshalb eine integrierte Forschungsstrategie zur Aufklärung mikrobiologisch gesteuerter Prozesse in tiefen sedimentären Ablagerungen unter Berücksichtigung mikrobiologischer, molekularökologischer, (bio)geochemischer, sedimentologischer und physikalischer Methoden angewendet. Die Struktur und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften werden anhand von geno- (DNA, RNA) und phänotypischen Analyseverfahren aufgeklärt, die GFZ-Sektion *Organische Geochemie* analysiert dabei u. a. die mikrobiellen Biomarker. Geochemische Studien geben Aufschluss über die vorhandenen Substrate und Elektronenakzeptoren. In weiterführenden Analysen werden Umsatzraten mittels hochsensitiver Radioisotopentechniken bestimmt. Die Kombination verschiedener Techniken, wie der Durchflusszytometrie mit spezifischen Markierungsmethoden (z. B. Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung, Stabile-Isotopenmarkierung), erlaubt es, gezielt bestimmte Gruppen von Mikroorganismen anzureichern und zu

Links: Mikroskopische Aufnahmen von Mikroorganismen aus terrestrischen Ablagerungen. a) Phasenkontrastaufnahme eines Aggregats von methanbildenden Mikroorganismen; b) fluoreszenzmikroskopische Aufnahme aller Mikroorganismen (blaue Zellen) in einer Sedimentprobe sowie der zuvor markierten methanbildenden Mikroorganismen (rote Zellen) (Fotos: O. Burckhardt, GFZ)

Left: Microscopic images of microorganisms in terrestrial deposits. a) Phase contrast image of a cell aggregate of methane producing microorganisms; b) fluorescence micrograph of all microorganisms in a sediment sample (blue cells) and labeled cells of methane producing microorganisms (red cells)

Kontakt: D. Wagner
(dirk.wagner@gfz-potsdam.de)

Abb. 1: Methodischer Einblick in die Arbeit der Geomikrobiologen: a) Arbeiten in der Handschuhbox (Glovebox) – ein gasdicht abgeschlossener Behälter für das Arbeiten unter einer definierten z. B. sauerstofffreien Atmosphäre und zwei Anaerobiertöpfe rechts vor der Glovebox dienen der Kultivierung von Mikroorganismen unter sauerstofffreien Bedingungen (Foto: J. Görsch, GFZ), b) Öffnen und Beproben eines Sedimentkerns nach definiertem Beprobungsschema (Foto: J. Görsch, GFZ), c) und d) wissenschaftliches Arbeiten auf einem Forschungsschiff (Fotos: J. Kallmeyer und C. Glombitza, GFZ), e) das mobile Geomikrobiologie-Labor „BugLab“ beim Abladen von einem Forschungsschiff (Foto: K. Mangelsdorf, GFZ) und f) Arbeiten im „BugLab“ während einer Expedition (Foto: C. Glombitza, GFZ)

Fig. 1: Methodological aspects of the work of a geomicrobiologists: a) Working under the glove box – a sealed container that is designed to work under defined conditions, for example oxygen-free atmosphere and two smaller incubation chambers for cultivation of microorganisms under anoxic conditions on the right in front of the glove box, b) opening and sampling a sediment core according to a defined sample scheme, c, d) scientific work on a research vessel, e) unloading of the mobile geomicrobiology lab “BugLab” from a research vessel and f) equipment of the “BugLab” during an expedition

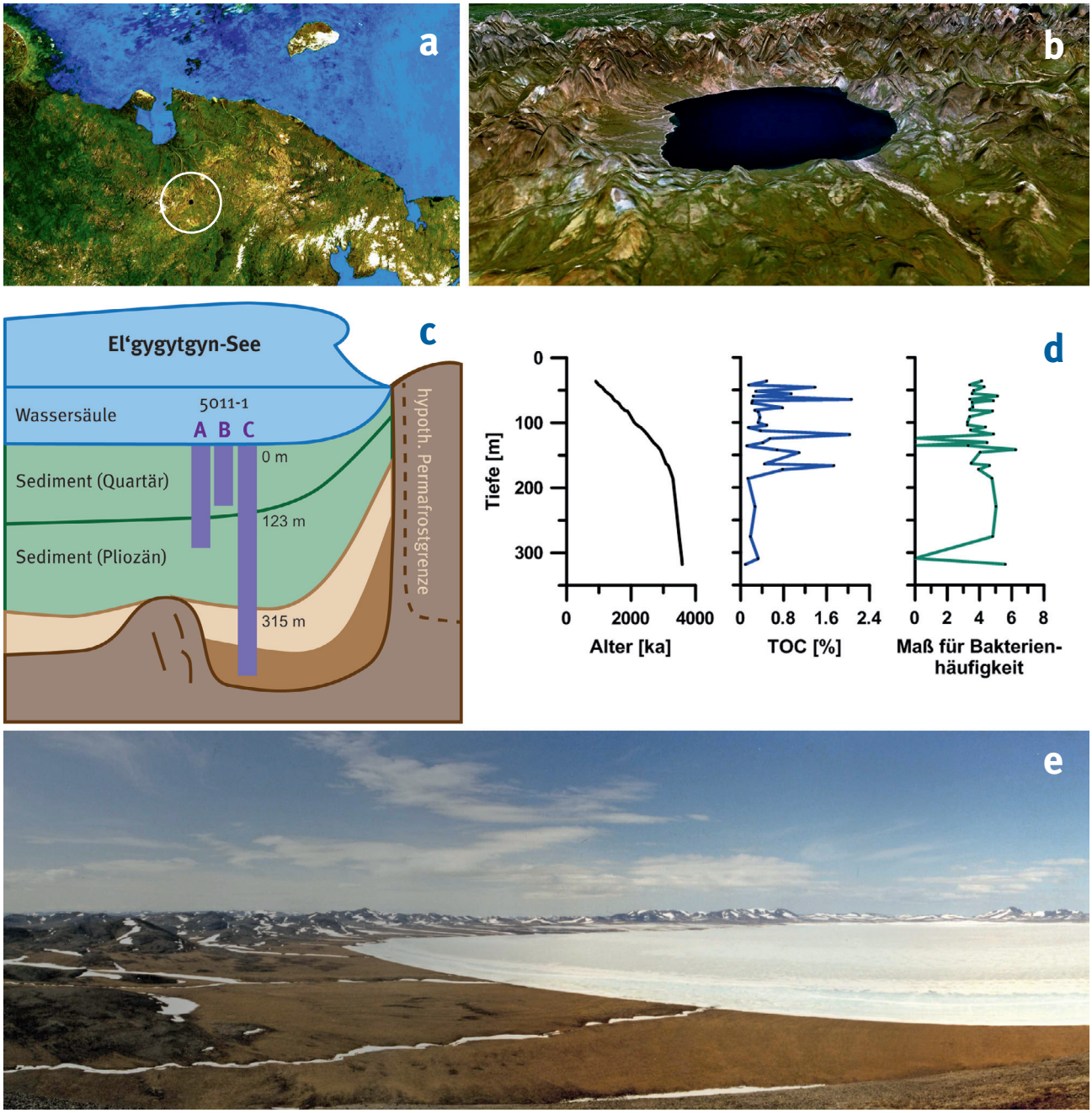


Abb. 2: Der El'gygytgyn-Kratersee als ein Beispiel für Forschung in der tiefen Biosphäre: a, b) Lokalität des Kratersees in der Russischen Arktis (Bilder: NASA World Wind), c) schematische Darstellung des Sees mit eingezeichneten Bohrungsstandorten, d) Alter und Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) sowie Bakterienhäufigkeit in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe, e) Teilansicht des Kratersees (Foto: S. Quart)

Fig. 2: The El'gygytgyn crater lake as an example for research in the deep biosphere: a, b) location of the crater lake in the Russian Arctic, c) schematic image of the lake with marked drilling locations, d) age and content of organic carbon (TOC) as well as rate of bacteria depending on the sediment depth, e) a partial view of the crater lake

untersuchen. Diese Techniken können neben klassisch-mikrobiologischen Methoden auch dazu benutzt werden, einzelne Arten zu isolieren, deren Physiologie und Phylogenie dann in weiterführenden Untersuchungen studiert werden können. Die gewonnenen Daten fließen anschließend in Modellierungen ein, die unter anderem zur Identifizierung von Kenntnislücken möglicher Stoffwechselwege und Stoffwechselnetzwerke genutzt werden.

Für zukünftige Expeditionen steht das mobile geomikrobiologische Labor „BugLab“ zur Verfügung. Es bietet den großen Vorteil, unterschiedliche Parameter an Proben direkt vor Ort messen zu können, die sonst kaum konserviert werden könnten. Zudem kann das Labor für die jeweiligen Einsätze spezifisch ausgestattet werden.

Mikroorganismen in bis zu 3,6 Mio. Jahre alten Seesedimenten

Mit dem aufgezeigten methodischen Ansatz konnten bereits erste Ergebnisse für den El'gygytgyn-Kratersee erzielt werden (Abb. 2). Dieser See stellt eine der am besten erhaltenen Meteoriteneinschlagstrukturen auf der Erde dar. Er war seit seiner Entstehung vor 3,6 Mio. Jahren (Layer, 2000) nicht vergletschert und konnte somit kontinuierlich Sedimentmaterial ansammeln. Heute finden wir eine mehr als 300 m mächtige Sedimentschicht am Grund des Sees, die sich im Lauf der Zeit in Abhängigkeit von den damals bestehenden Umweltbedingungen durch Eintragung von außen bzw. durch das Absinken von Biomasse innerhalb des Sees ausgebildet hat. Diese Seesedimente beinhalten einzigartige Informationen über das damalige Klimageschehen, die Vegetationsbedeckung im Einzugsbereich des Sees und die Geschichte des Lebens seit dem Meteoriten-Einschlag.

Im Jahre 2009 wurde im Rahmen einer internationalen Bohrkampagne (Melles et al., 2012, vgl. auch Beitrag „Klimabohrung am nördlichen Polarkreis“ in der Rubrik Netzwerk in diesem Heft) ein 317 m langer Sedimentkern erbohrt, welcher mehrere Kalt- und Warmphasen umfasst. Anhand dieses Sedimentmaterials ist es möglich, durch eine Kombination verschiedener Methoden die mikrobielle Gemeinschaft der Vergangenheit – bis hin zur Entstehung des Kraters vor 3,6 Mio. Jahren – zu rekonstruieren. Von besonderem Interesse sind neben der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft und deren Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen, Aussagen über die Häufigkeit einzelner Mikroorganismen und darüber, ob in den alten Sedimentschichten lebende und somit stoffwechselaktive Mikroorganismen existieren.

Erste Ergebnisse zeigen, dass eine erfolgreiche Extraktion von DNA (Trägermolekül der Erbinformationen) aus allen Sedimentproben möglich war und dass sowohl DNA von Bakterien als auch von den sogenannten Archaeen – einzellige, ursprüngliche Mikroorganismen – für die weiteren Analysen vervielfältigt werden konnte. Zudem wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Diversität und dem Gehalt organischen Kohlenstoffs, aus dem sich mögliche Nährstoffe speisen, nachgewiesen. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass die mikrobiellen Gemeinschaften indirekt durch Klimaveränderungen beeinflusst werden. Aufgrund des Wasserkörpers sind die Seesedimente zwar vor dem direkten Einfluss wechselnder Temperaturverhältnisse geschützt, dennoch ändern sich beispielsweise während einer Warmphase die Umweltbedingungen innerhalb des Sees: schwedische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler konnten in Warmphasen anhand der biologischen Silikatbildung eine Algenblüte nachweisen, wodurch große Mengen an leichtabbaubarer organischer Substanz in die Sedimente gelangen. Aufgrund der dadurch bedingten guten Nährstoffversorgung steigt schließlich auch die Häufigkeit und Diversität der Mikroorganismen in den Ablagerungen an.

Die bisher erzielten Ergebnisse belegen, dass auch in sehr alten Sedimenten aktives mikrobiologisches Leben zu finden ist. Des Weiteren geben die Resultate aus dem El'gygytgyn-Kratersee Aufschluss über Veränderungen des Klimas in der Vergangenheit und wie die mikrobiellen Gemeinschaften darauf reagiert haben. Diese Informationen tragen zum Verständnis der Klimaentwicklung auf der Erde bei anhaltend steigenden Temperaturen, wie wir sie im Moment im Zug der globalen Erwärmung beobachten, bei.

Ein Drittel weniger Leben auf der Erde als bisher bekannt

Ein weiteres Beispiel zur Biomasse in der tiefen Biosphäre dokumentiert, wie groß der Forschungsbedarf zu dieser Thematik ist. Bisherige Abschätzungen der globalen Biomasse gingen davon aus, dass etwa die Hälfte der lebenden Biomasse in Mikroorganismen der tiefen terrestrischen und marinen Biosphäre lokalisiert ist. Diese Abschätzungen beruhten jedoch nur auf wenigen Bohrkernen aus den Auftriebsgebieten des Ostpazifiks (Parkes et al., 1994). Schon seit etwa zehn Jahren wurden diese Zahlen als zu hoch angesehen, aber aufgrund fehlender Daten konnte diese Vermutung nicht überprüft werden.

In den letzten sechs Jahren unternahm Jens Kallmeyer mehrere Expeditionen in das nährstoffärmste Gebiet der Weltmeere, den Südpazifischen Wirbel. Zusammen mit weiteren Proben aus anderen Gebieten entstand so eine neue und wesentlich größere Datenbasis über die Verteilung der Mikroorganismen in tiefen marinen Sedimenten, wie sie zuvor nicht zur Verfügung stand (Kallmeyer et al., 2012).

Insgesamt wurden Zellzählungen aus 34 Bohrkernen für die Studie genutzt (Abb. 3). Die Zellverteilung über die Sedimenttiefe wurde mit verschiedenen ozeanographischen Parametern wie beispielsweise der Sedimentationsrate, Entfernung vom Land, Wassertiefe und -temperatur korreliert. Eine besonders gute Korrelation ergab sich mit der Sedimentationsrate und Entfernung vom Land. Mit diesen beiden Parametern können etwa 80 % der Variabilität der Zellverteilung im Sediment erklärt werden. Aufgrund dieser Datenbasis konnte eine neue Abschätzung vorgenommen werden, die die Zellzahlen für die tiefe marine Biosphäre um etwa 90 % gegenüber den in der

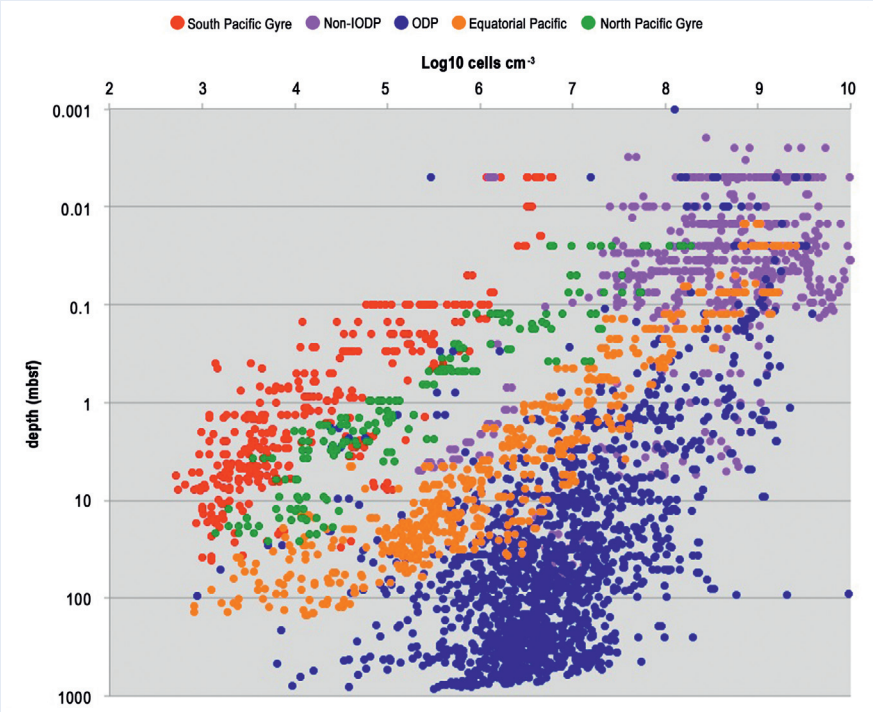


Abb. 3: Tiefenprofile der Gesamtzellzahlen für Mikroorganismen im Meeresboden verschiedener Meeresgebiete (ODP = ocean drilling program; IODP = international ocean drilling program)

Fig. 3: Vertical profile of microbial cell counts in marine sediments of different study sites (ODP = ocean drilling program; IODP = international ocean drilling program)

Vergangenheit kalkulierten Zahlen reduzierte. Außerdem wurde zum ersten Mal die Größenverteilung der Zellen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Zellen wesentlich kleiner sind als bisher angenommen und, dass ihr Kohlenstoffgehalt ebenfalls deutlich geringer ist. Aufgrund der nun vorliegenden detaillierten Kenntnisse zur Verteilung von Mikroorganismen im Meeresboden und ihrer metabolischen Aktivität, können die bisher vorliegenden Modelle über biogeochemische Prozesse im Meeresboden verbessert werden.

Ausblick

Bisherige Untersuchungen zur tiefen Biosphäre, die vor allem an marinen Sedimenten durchgeführt wurden, zeigen die Bedeutung von Mikroorganismen in diesem extremen Lebensraum auf. Die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften, ihre Funktion in den wichtigen Stoffkreisläufen und ihre Reaktion auf sich ändernde Umweltbedingungen sind jedoch noch weitgehend unbekannt. Hier wird die zukünftige Forschung am GFZ ansetzen. Mit Hilfe kombinierter hochauflösender Methoden werden die wichtigsten Mikroorganismengruppen und ihre Schlüsselorganismen insbesondere in kontinentalen Ablagerungen identifiziert und ihre Bedeutung für die Stoffflüsse, die Mineralverwitterung sowie die Stabilität und Qualität von Lagerstätten im weitesten Sinn untersucht. Zu diesem Zweck werden mittelfristig kontinentale Tiefbohrungen mit einer geomikrobiologischen Komponente im Rahmen des „International Continental Scientific Drilling Program (ICDP)“ initiiert. Darüber hinaus wird der Aufbau einer fachübergreifenden Plattform für biogeowissenschaftliche Fragestellungen im Bereich der Tiefen-Biosphären-Forschung am GFZ geplant. Dieses sogenannte BioGeoLab soll die räumlichen Voraussetzungen für eine interdisziplinäre Teamarbeit schaffen sowie spezielle Labore, beispielsweise für Langzeitexperimente oder Untersuchungen unter In-situ-Bedingungen wie hohe Drücke und hohe Temperaturen, zur Verfügung stellen.

Literatur

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 (PNAS), 109, 40, 16213-16216, 10.1073/pnas.1203849109.

Layer, P. W. (2000): Argon-40/argon-39 age of the El'gygytgyn impact event, Chukotka, Russia. - Meteoritics & Planetary Science, 35, 3, 591-599, 10.1111/j.1945-5100.2000.tb01439.x.

Melles, M., Brigham-,Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N. R., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia-,Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - Science, 337, 6092, 315-320, 10.1126/science.1222135.

Parkes, R. J., Cragg, B., Bale, S. J, Getliff, J. M., Goodman, K., Rochelle, P. A., Fry, J. C., Weightman A. J., Harvey, S. M. (1994): Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. – Nature, 371, 6496, 410-413, 10.1038/371410a0.

Wagner, D., Gattinger, A., Embacher, A., Pfeiffer, E.-M., Schloter, M., Lipski, A. (2007): Methanogenic activity and biomass in Holocene permafrost deposits of the Lena Delta, Siberian Arctic and its implication for the global methane budget. - Global Change Biology, 13, 5, 1089-1099, 10.1111/j.1365-2486.2007.01331.x.

Whitman, B., Coleman, D. C., Wiebe, W. J. (1998): Prokaryotes: the unseen majority. - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 95, 12, 6578-6583.