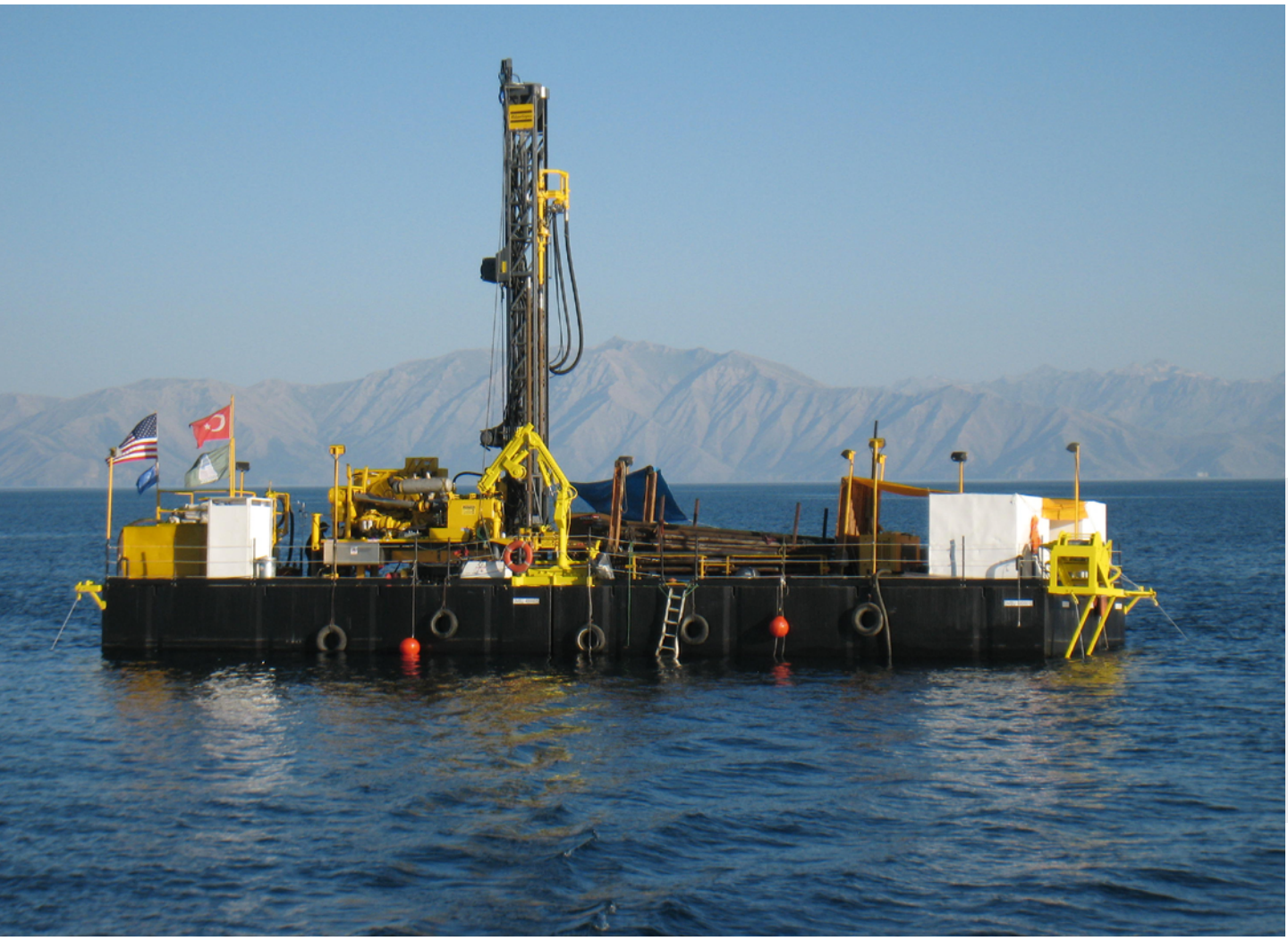
Die tiefe Biosphäre

Jens Kallmeyer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Since the early days of Deep Biosphere research almost 100 years ago, this research field has gained momentum over the last 30 years. Much new information could be gained, some of it challenged our concepts about the limits of life and the mechanisms of global biogeochemical cycles. Besides the scientifically motivated questions, there are many applied aspects that play a major role in this research area. Industrial utilization of the deep subsurface is rapidly increasing, and decisions about utilization concepts require a profound knowledge about the processes that control these environments. Much of this process understanding is still lacking. Additional to research on processes, GFZ cultivates previously unknown microbes from deep biosphere environments. These organisms allow studying the adaptations to the peculiar environmental conditions and isolation of novel biomolecules with potential biotechnological applications.



System Erde (2015) 5, 1 | DOI: 10.2312/GFZ.syserde.05.01.1

Was ist die tiefe Biosphäre?

Die tiefe Biosphäre stellt das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde dar. Ihr Habitat, die Porenräume in Sedimenten sowie Klüfte und Spalten im Festgestein, durchziehen die gesamte Erdkruste mit einem kontinuierlichen Netzwerk.

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

Die Erforschung der tiefen Biosphäre

Bereits in den 1920er Jahren ließen sich in den Produktionswässern von schwefelwasserstoffhaltigen Ölfeldern Mikroben nachweisen. Eine weitere Arbeit konnte in den 1950er Jahren zeigen, dass selbst in der Tiefsee bis in mehreren Metern Sedimenttiefe Mikroben vorkommen. Der Begriff „tiefe Biosphäre“ wurde 1994 zum ersten Mal in der Literatur verwendet (*Parkes et al., 1994*). In den letzten zwanzig Jahren hat sich die Erforschung des Lebens im tiefen Untergrund von einem Nischenthema zu einer wichtigen Forschungsrichtung entwickelt. Auf der wissenschaftlichen Seite beschäftigen sich zwei internationale Programme mit der Erforschung des tiefen Untergrunds durch Bohrungen: das landbasierte Internationale Kontinentale Bohrprogramm (International Continental Scientific Drilling Program, ICDP), welches am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordiniert wird, und das Tiefseebohrprogramm Integrated Ocean Discovery Program (IODP),

Abb. 1: Die Anzahl und Aktivität der Mikroben des tiefen Untergrunds ist wesentlich niedriger als an der Erdoberfläche, außerdem reagieren sie sehr empfindlich auf eine Veränderung der Lebensbedingungen. Daher ist es sehr wichtig, eine Kontamination mit Mikroben von der Oberfläche auszuschließen und die Proben während der Verarbeitung möglichst wenig zu verändern.
a) Einige wichtige Parameter zum Verständnis der physikalischen und chemischen Bedingungen in der tiefen Biosphäre, wie hier z. B. die Sauerstoffkonzentration in einem Sedimentkern, können auf speziell ausgerüsteten Bohrschiffen mit Mikroelektroden direkt nach der Entnahme des Bohrkerns gemessen werden.
b) Da wichtige Messparameter von der Temperatur abhängen, müssen die Arbeiten unter Umgebungstemperatur durchgeführt werden. An Bohrkernen aus der Tiefsee finden die Arbeiten daher im Kühlraum bei 4 °C statt.
c) Dr. Yohey Suzuki von der Universität Tokyo beim Zerlegen eines frisch erbohrten Basaltkerns aus der ozeanischen Kruste. Um an unkontaminiertes Material zu gelangen, muss die äußere Schicht der Probe mit Hammer und Meißel entfernt werden. Beim Sägen würde aufgrund der Wasserkühlung die Kontamination weiter in das Gestein eindringen. (Fotos: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 1: Numbers and activity of subsurface microbes are much lower than in surficial samples. Moreover, these microbes react sensitively to changes in environmental conditions. It is therefore very important to avoid any contamination with surface microbes and to disturb the samples as little as possible during processing.
a) Some parameters, which are important for our understanding of the physical and chemical conditions in the deep biosphere, like for example oxygen concentration in a sediment core, can be measured immediately after retrieval of the core on board the drill ship.
b) Many important parameters depend on temperature, therefore all processing has to be carried out at in-situ temperature. For drill cores from the deep sea this means that all work has to be carried out at 4 °C in the cold room.
c) Dr. Yohei Suzuki from the University of Tokyo sections a freshly drilled piece of basalt from the oceanic crust. The outer layer has to be removed by hammer and chisel to obtain uncontaminated material. Sawing requires water cooling, which would transport contamination further into the sample.

Links: Bohrprojekt des International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) am Vansee, Türkei. Im Rahmen dieses Projekts wurden neben biogeochemischen Analysen auch mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt. (Foto: F. Anselmetti, Universität Bern)

Left: ICDP drilling project at Lake Van, Turkey. As part of this project biogeochemical and microbiological analyses were carried out.

Kontakt: J. Kallmeyer
(jens.kallmeyer@gfz-potsdam.de)

Abb. 2: Das mobile Geomikrobiologielabor BugLab des GFZ bei der Verladung am Vansee, Türkei. Mit dem BugLab steht auch an abgelegenen Standorten ein komplett ausgestattetes Mikrobiologielabor zur Verfügung. (Foto: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 2: Offloading the mobile geomicrobiology laboratory BugLab of GFZ at Lake Van, Turkey. The BugLab provides a fully equipped microbiological laboratory even at very remote locations.

welches schon diverse Vorgängerprogramme hatte (DSDP, ODP) und nun seit rund 40 Jahren kontinuierlich betrieben wird. Es handelt sich dabei um eines der weltweit ältesten internationalen Forschungsprojekte. Die erste ODP-Bohrkampagne, die speziell zur Erforschung der tiefen Biosphäre durchgeführt wurde, fand 2002 im Auftriebsgebiet vor Peru statt. Die beiden vom IODP betriebenen Bohrschiffe sind mit geomikrobiologischen Laboratorien ausgestattet (Abb. 1).

Das ICDP als terrestrisches Partnerprogramm fing erst mit gewisser Verzögerung an, die Erforschung der tiefen Biosphäre in sein Forschungsprogramm aufzunehmen. Im Sommer 2015 wurde im Rahmen eines ICDP-Projekts erstmals ein eigener Kern für geomikrobiologische und geochemische Untersuchungen gebohrt. An dieser Bohrkampagne am Towutisee, Indonesien, sind insgesamt fünf geochemisch und geomikrobiologisch arbeitende Gruppen beteiligt, darunter auch das GFZ, welches das mobile Geomikrobiologie-Labor „BugLab“ zur Verfügung stellt (Abb. 2). Weitere Bohrprojekte mit einem starken geomikrobiologischen Schwerpunkt sind derzeit in Planung.

Seit etwa fünfzehn Jahren beteiligt sich das GFZ an Forschungsprojekten zur tiefen Biosphäre: Das Feld reicht von marinen Bohrungen im Rahmen von IODP und seinen Vorläufern *(Horsfield et al., 2006; Mangelsdorf et al., 2011),* über terrestrische Bohrungen im Rahmen von ICDP *(Bischoff et al., 2013; Glombitza et al., 2013)* und eigenfinanzierten Bohrungen *(Fry et al., 2009)* sowie im Permafrost *(Mangelsdorf et al., 2005)* und in tiefen südafrikanischen Goldminen *(Lippmann et al., 2003)*. Neben diesen eher im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelten Forschungsprojekten wird auch anwendungsbezogen geforscht, z. B. im Themenfeld der CO_2-Untergrundspeicherung *(Wandrey et al., 2010)*.

Neben dem rein wissenschaftlichen Interesse an der Erforschung der tiefen Biosphäre zeigt die Industrie ein großes Interesse an dieser Forschungsrichtung, da auch sie den tiefen Untergrund immer stärker nutzt. Die Nutzung ist vielfältig: sie reicht von der Ausbeutung von Lagerstätten, die Nutzung oder Speicherung von Wärme, bis hin zur langfristigen Einlagerung von Abfällen. Alle diese Nutzungen beanspruchen einerseits Platz im Untergrund, so dass möglicherweise Konflikte mit zunehmender Nutzungsintensität entstehen; andererseits können ohne eine genaue Kenntnis der dort ablaufenden Prozesse keine Aussagen über die langfristigen Auswirkungen der Untergrundnutzung gemacht werden. Gerade die langfristige Sicherheit von geotechnischen Eingriffen in den Untergrund ist von großer gesellschaftlicher Relevanz, wie in jüngster Zeit die Diskussionen um die Lagerung von CO_2 und radioaktivem Abfall oder die Nutzung von Fracking und Geothermie zeigen.

Technische Herausforderungen

Während sich die Biosphäre an der Oberfläche relativ einfach untersuchen und über Satellitendaten und Monitoring-Stationen auch in der Fläche relativ gut erfassen lässt, ist man bei der Erforschung der tiefen Biosphäre immer auf Bohrungen angewiesen (Abb. 3). Diese sind mit einem hohen finanziellen und logistischen Aufwand verbunden und liefern zudem nur Informationen über ein räumlich sehr kleines Gebiet. Eine Erfassung der Heterogenität in der Fläche ist nur schwer möglich. Doch nicht nur die Heterogenität stellt die Wissenschaft vor ein Problem. Im Vergleich zum Leben an der Oberfläche läuft das Leben in der Tiefe in extrem verminderter Geschwindigkeit ab. Zum einen haben die im Untergrund lebenden Mikroben einen deutlich langsameren Stoffwechsel, zum anderen gibt es viel weniger Zellen. Durch diese beiden Faktoren sinken die Umsatzraten pro Sedimentvolumen drastisch ab.

Hier lässt sich z.T. durch Modellierung Abhilfe schaffen. Am Computer ist es möglich, viele Vorgänge zu simulieren und somit ein verbessertes Verständnis der ablaufenden Prozesse zu erzielen. Trotz aller Fortschritte auf diesem Gebiet kann jedoch eine Modellierung nur so gut sein, wie die Messwerte, auf denen sie aufbaut. Darüber hinaus ist es natürlich notwendig, die in der Natur ablaufenden Prozesse erst einmal verstanden zu haben, bevor man sie modellieren kann. Trotz aller Fortschritte bei der Modellierung ist daher die Gewinnung von Proben durch Tiefbohrungen unerlässlich.

Warum wird die tiefe Biosphäre erforscht?

Wie dargestellt, ist die tiefe Biosphäre nicht nur das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde und enthält einen signifikanten Anteil an der globalen lebenden Biomasse und viele wichtige Ressourcen, sondern sie stellt auch unser generelles Verständnis über die Bedingungen für Leben im Allgemeinen auf den Prüfstand. Die Erforschung der tiefen Biosphäre zielt auf Antworten zu den folgenden Fragen:

- Wie verbreitet und divers ist das Leben in der tiefen Biosphäre und was sind die Grenzen des Lebens?
- Welche metabolische Aktivität und Kapazität hat das Leben in der tiefen Biosphäre; welche Formen von Kohlenstoff und Energiequellen werden von den Organismen genutzt?
- Welche evolutiven Anpassungen und Überlebensstrategien haben die Organismen der tiefen Biosphäre?
- Welche natürlichen Ressourcen entstehen durch biologische Aktivität bzw. werden durch sie vernichtet; gibt es biotechnologische Applikationen von Organismen oder Metaboliten aus der tiefen Biosphäre?
- 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?

Jede dieser Fragen ist in zahlreichen Studien behandelt worden, und viele neue Erkenntnisse konnten gewonnen werden. Aber dennoch ist auch nach 30 Jahren Forschung das Wissen noch bei Weitem nicht auf dem gleichen Stand wie etwa im Bereich der erdoberflächennahen Systeme. Dieser Mangel ist nicht nur wissenschaftlich unbefriedigend, er erschwert auch die Aussagen über die langfristigen Effekte von menschlichen Eingriffen in den Untergrund und führt deutlich vor Augen, dass es in diesem Forschungsfeld keine scharfe Trennung zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung gibt.

So wurde in einem Kooperationsprojekt des GFZ mit dem norwegischen Explorationskonzern Lundin Petroleum festgestellt, dass die geophysikalischen Daten, die auf massive natürliche Gasaustritte hindeuteten, falsch waren. Nur durch aufwändige biogeochemische Analysen konnte erklärt werden, wie und wann sich die massiven Strukturen am Meeresboden gebildet haben und warum sie momentan inaktiv sind. Neben dem ökonomisch wichtigen Resultat, dass sich wahrscheinlich kein großes Gasfeld im Untergrund befindet, konnten wertvolle Daten für die Interpretation von organisch-geochemischen Parametern gewonnen werden, welche für die generelle Interpretation von tiefen marinen Sedimenten genutzt werden können *(Nickel et al., 2013)*.

Grenzen für das Leben

Grenzen für das Leben im Untergrund werden nach bisherigem Wissen nur durch die Temperatur gesetzt. Noch für keinen chemischen oder physikalischen Parameter konnte die absolute Grenze für das Leben gefunden werden. Auch bei anderen Parametern wie Druck oder pH-Wert sind wir noch weit davon entfernt, die absoluten Grenzen zu kennen. Im Labor wurden Mikroben bereits Drücken ausgesetzt, die normalerweise in Hunderten von Kilometern Tiefe herrschen – einem Bereich, in dem die Temperatur auf der Erde auf jeden Fall weit außerhalb des biologischen Bereichs liegt. Zumindest einige Zellen überlebten diese Behandlung.

Extreme pH-Werte sind ein anderes, weitgehend unerforschtes Feld. Bisher wurde noch in keinem natürlich vorkommenden Ökosystem ein pH-Wert gefunden, der Leben unmöglich macht. Selbst bei extremen Werten unter pH 1 können einige Mikroben noch gut leben *(Schleper et al., 1995)*; nach oben scheint die Grenze bei ca. pH 12,5 zu liegen *(Takai et al., 2005)*. Es gibt zwar noch höhere pH-Werte, die Skala geht bis 14, aber in der Natur kommen sie nicht vor.

Die tiefe Biosphäre zeichnet sich 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

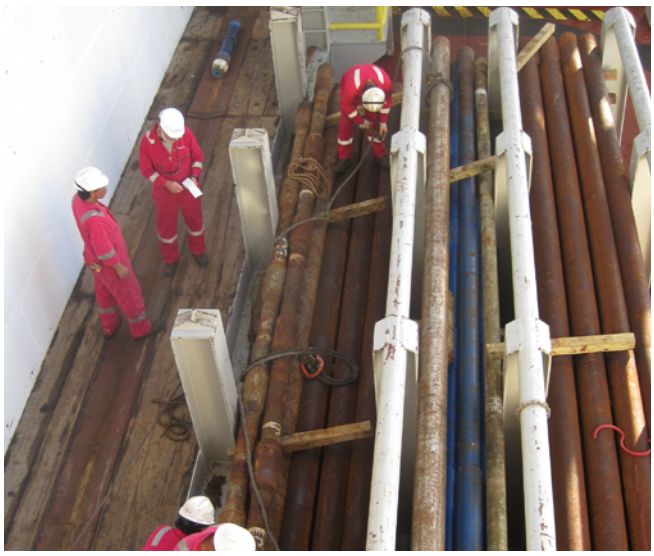


Abb. 3: Unabhängig davon, ob man an Land oder in den Meeresboden bohrt, eine Bohrung erfordert immer einen hohen logistischen, technischen und finanziellen Aufwand. Links: Die Bohrmannschaft des IODP-Bohrschiffs JOIDES Resolution bei der Kontrolle des Bohrgestänges. Das Schiff hat über 12 km Gestänge geladen. Rechts: Bohrturm auf der JOIDES Resolution (Fotos: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 3: Irrespective of land or at sea, drilling requires great logistical, technical and financial resources. The drilling crew of the IODP drill ship JOIDES Resolution inspects the drill string, the ship has over 12 km of string. Right: The drilling rig of the JOIDES Resolution

gibt, wo die Nährstoffversorgung so minimal ist, dass die mikrobielle Population „ausgehungert" wird. Selbst in Sedimenten, die bis zu 100 Mio. Jahre alt sind und kontinuierlich unter sauerstoffhaltigen Bedingungen lagerten, fand sich noch Leben *(D'Hondt et al., 2015)*.

Ausblick

Die tiefe Biosphäre ist ein faszinierendes Forschungsfeld, welches neben vielen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen auch eine zunehmende gesellschaftliche Relevanz besitzt. Neues Probenmaterial lässt sich dabei nur durch Bohrungen erhalten, was mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Während die beiden wissenschaftlichen Bohrprogramme IODP und ICDP eine wichtige Quelle für Proben sind, sollten auch andere Möglichkeiten, wie z. B. Kooperationen mit Industriepartnern genutzt werden. Der immer noch bestehende Mangel an grundlegendem Prozessverständnis erfordert, dass wissenschaftliche und angewandte Fragestellungen gleichermaßen betrachtet werden sollten.

Literatur

Bischoff, J., Mangelsdorf, K., Gattinger, A., Schloter, M., Kurchatova, A. N., Herzschuh, U., Wagner, D. (2013): Response of methanogenic archaea to late pleistocene and holocene climate changes in the siberian arctic. - Global Biogeochemical Cycles, 27, 2, p. 305-317.

D'Hondt, S., Inagaki, F., Zarikian, C. A., Abrams, L. J., Dubois, N., Engelhardt, T., Evans, H., Ferdelman, T., Gribsholt, B., Harris, R. N., Hoppie, B., Hyun, J.-H., Kallmeyer, J., Kim, J., Lynch, J. E., McKinley, C., Mitsunobu, S., Morono, Y., Murray, R. W., Pockalny, R., Sauvage, J., Shimono, T., Shiraishi, F., Smith, D. C., Smith-Duque, C., Spivack, A. J., Steinsbu, B. O., Suzuki, Y., Szpak, M., Toffin, L., Uramoto, G., Yamaguchi, Y. T., Zhang, G.-l., Zhang, X.-H., Ziebis, W. (2015): Presence of oxygen and aerobic communities from sea floor to basement in deep-sea sediments. - Nature Geoscience, 8, p. 299-304.

Fry, J. C., Horsfield, B., Sykes, R., Cragg, B. A., Heywood, C., Tae Kim, G., Mangelsdorf, K., Mildenhall, D. C., Rinna, J., Vieth-Hillebrand [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, p. 163-178.

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, 209.

Horsfield, B., Schenk, H. J., Zink, K.-G., Ondrak, R., Dieckmann, V., Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., di Primio, R., Wilkes, H., Parkes, R. J., Fry, J., Cragg, B. (2006): Living microbial ecosystems within the active zone of catagenesis: implications for feeding the deep biosphere. - Earth and Planetary Science Letters, 246, 1-2, p. 55-69.

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, p. 16213-16216.

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 36Cl, Witwatersrand Basin, South Africa. - Geochimica et Cosmochimica Acta, 67, 23, p. 4597-4619.

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: Dallimore, S. R., Collett, T. S. (Eds.), Scientifique Results from Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, (GSC Bulletin; 585), Geological Survey of Canada, p. 1-11.

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, p. 91-101.

Nickel, J., di Primio, R., Kallmeyer, J., Hammer, Ø., Horsfield, B., Stoddart, D., Brunstad, H., Mangelsdorf, K. (2013): Tracing the origin of thermogenic hydrocarbon signals in pockmarks from the southwestern Barents Sea. - Organic Geochemistry, 63, p. 73-84.

Parkes, R. J., Cragg, B. A., 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, p. 410-413.
DOI: http://doi.org/10.1038/371410a0

Schleper, C., Puehler, G., Holz, I., Gambacorta, A., Janekovic, D., Santarius, U., Klenk, H. P., Zillig, W. (1995): Picrophilus gen. nov., fam. nov.: a novel aerobic, heterotrophic, thermoacidophilic genus and family comprising archaea capable of growth around pH 0. - Journal of Bacteriology, 177, 24, p. 7050-7059.

Takai, K., Moyer, C. L., Miyazaki, M., Nogi, Y., Hirayama, H., Nealson, K. H., Horikoshi, K. (2005): Marinobacter alkaliphilus sp. nov., a novel alkaliphilic bacterium isolated from subseafloor alkaline serpentine mud from Ocean Drilling Program Site 1200 at South Chamorro Seamount, Mariana Forearc. – Extremophiles, 9, 1, p. 17-27.

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, p. 972-980.