

# Mikrobiologische Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

Mashal Alawi, Tobias Nickschick, Horst Kämpf  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Microbial processes in the so-called 'Deep Biosphere' and the link to geological processes are not well understood. We hypothesize that in active fault zones and especially in CO<sub>2</sub>-conduits, due to an intensified substrate support, microbial processes are significantly accelerated compared to other continental Deep Biosphere ecosystems. Therefore active fault zones could be seen as 'Hot Spots' of microbial life in the deep subsurface. The Cheb Basin (Czech Republic) is a shallow Neogene, intracontinental basin filled with fluvial and lacustrine sediments. The intersection area of the north-south striking Počátky-Plesná Fault zone with the northwest-southeast directed Mariánské Lázně Fault Zone is nearly permanently seismically active (earthquake swarms up to M 4.5). South of the epicentral area two CO<sub>2</sub>-diffuse degassing structures are visible on a decameter scale. The CO<sub>2</sub>-conduits are considered as important structures for the understanding of lithospheric mantle-crust interaction processes via mantle fluids, however rock-fluid and geo-bio interactions are barely understood in this system. Moreover, there are hints that the microbial turnover in this region, e.g. CH<sub>4</sub> production, is significantly accelerated after earthquakes. In the frame of a DFG project a pre-examination study to a planned international ICDP-drilling campaign started, which includes a 120 m deep drilling at the Hartoušov mofette field. The aim of the study is to get first insights into the microbial community structure by applying modern high-throughput DNA sequencing techniques and geochemical analysis.*



Für die Erforschung des Systems Erde haben die Prozesse im tiefen Untergrund eine ähnliche Bedeutung wie die oberflächennahen Prozesse. Betrachtet man die globalen Stoffkreisläufe, wird deutlich, dass beide Bereiche eng verknüpft sind (vgl. Beitrag von Kallmeyer „Die tiefe Biosphäre“ in diesem Heft). Auch in der Tiefe katalysieren Mikroorganismen die Interaktionen zwischen den Fluiden und dem Gestein. Von besonderem Interesse sind dabei Bruchstörungszonen, weil dort aktive Energie- und Stoffaustauschprozesse (Erdbeben, Fluidtransport) stattfinden, die sich auf die Entstehung von Biomolekülen und die Aktivität der Mikroorganismen auswirken. Das hierzu verfügbare Wissen ist jedoch noch sehr gering (z. B. Bräuer *et al.*, 2005a; Schreiber *et al.*, 2012).

Im Rahmen des am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordinierten DFG-Projekts „Mikrobielle Prozesse in der Tiefen Biosphäre der CO<sub>2</sub>-dominierten aktiven Störungszone in NW-Böhmen“ wird die Wechselwirkung zwischen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-gesättigten Fluiden, Gesteinen und mikrobiellen Prozessen in einem seismisch- und mantelfluid-aktiven Gebiet untersucht. Die gewonnenen Daten bilden eine wichtige Grundlage für das im Rahmen des International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) beantragte internationale Bohrprojekt „Drilling the Eger Rift: an observatory for study of fluid flow through the crust, non-volcanic, mid-crustal earthquake swarms and the deep biosphere“ (Dahm *et al.*, 2013).

## Magmen-/Fluidaufstieg und Erdbebenschwärme

Die Region Vogtland-Nordwest-Böhmen-Nordost-Bayern (westlicher Ohře-/Eger-Graben), Teil eines etwa 150 km langen und rund 40 km breiten Gebiets zwischen Mariánské Lázně/Marienbad und Leipzig, ist bekannt für ihre Erdbebenschwärme und

tektonischen Beben. Bei Erdbebenschwärmen handelt es sich um eine besondere Art von Seismizität, die weltweit typisch ist für aktive ozeanische bzw. kontinentale Grabenzonen (Rifts) mit magmatischem und/oder vulkanischem Geschehen. Erdbebenschwärme haben kein herausragendes seismisches Ereignis wie tektonische Beben. Große Schwärme können bis zu mehreren Monaten andauern. Sie setzen sich aus einer Vielzahl von nahezu gleichstarken Beben zusammen, die häufig eine ähnliche Wellenform aufweisen.

Unser Studiengebiet, das Cheb-Becken (Tschechien), ist ein kleines intrakontinentales Sedimentbecken, das mit Sedimenten aus dem Tertiär und Quartär gefüllt ist. Das Cheb-Becken liegt im Zentrum des Kreuzungsbereichs des Eger-Grabens und der Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone. Bisher sind aus dem Quartär nur zwei kleine Schlackenkegel und ein Maar bekannt (Altersbereich: 0,12 bis 0,78 Mio. Jahre). Neben dem Rio Grande-Rift und dem Bereich des Ostafrikanischen Tiefenbruchs in Kenia zählt die Region mit dem Cheb-Becken zu den seismisch aktivsten kontinentalen Erdbebenschwarmgebieten ohne aktiven Vulkanismus weltweit (Fischer *et al.*, 2014).

Charakteristisch sind zahlreiche Mineralquellen und CO<sub>2</sub>-Austritte (Mofetten), die zum Teil als Kurbäder und Mineralwasser-Produktionsstätten wirtschaftlich intensiv genutzt werden (Bädereinrichtungen im Bereich der Tschechischen Republik: Františkovy Lázně/Franzensbad, Karlovy Vary/Karlsbad, Mariánské Lázně/Marienbad; in Deutschland: Bad Elster, Bad Brambach, Sybillenbad). Grundsätzlich wird zwischen trockenen und nassen Mofetten unterschieden, beide Typen kommen im Untersuchungsgebiet vor (Abb. 1).

Im Ergebnis einer regionalen gas- und isotopengeochemischen Kartierung von CO<sub>2</sub>-Austrittsstellen im westlichen Eger-Graben konnte mittels Helium- und Kohlenstoffisotopie nachgewiesen werden, dass das CO<sub>2</sub>-dominierte Quellgas magmatischen Ursprungs ist und aus dem lithosphärischen Mantel stammt (Weinlich *et al.*, 1999). Im Vergleich zu diesen Ergebnissen aus den Jahren 1992 bis 1996 wurden im Ostteil des Cheb-Beckens ab 2000 deutlich höhere <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnisse gemessen, während sich im Entgasungsgebiet von Marienbad und Umgebung kein Anstieg zeigte (Bräuer *et al.*, 2005b). Der Anstieg an Mantelhelium erfolgte nach 2000 progressiv zuerst an der Mofette Bublák (Abb. 1a und 2). Unter diesem Gebiet wird eine aktive magmatische Quelle mit räumlich-zeitlicher Dynamik vermutet. Im Frühjahr 2006 wurde an Entgasungsstellen im Ostteil des Cheb-Beckens ein etwa drei Monate andauernder, weiterer Anstieg von Mantelhelium beobachtet. Es wird angenommen, dass für diesen Anstieg die Zufuhr von frischem, weniger entgastem Magma aus einem tieferen Re-

Links: Transekt der Vegetation und des CO<sub>2</sub>-Gehalts im Bublák-Mofettenfeld, nördlich von Hartoušov (Tschechien).

Der unterschiedliche Bewuchs ist indikativ für die Stärke der CO<sub>2</sub>-Entgasung. Es wurden, ausgehend vom Zentrum der CO<sub>2</sub>-Entgasungsstelle (Vordergrund), drei Flachbohrungen durchgeführt. Dargestellt am linken Bildrand ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in ca. 80 cm Tiefe. (Foto: M. Alawi, GFZ)

Left: Transect of vegetation and CO<sub>2</sub> content in the Bublák mofette field, north of Hartoušov (Czech Republic). Differences in the vegetation are indicative for the strength of CO<sub>2</sub> degassing. Beginning from the center of the CO<sub>2</sub>-degassing (foreground), three drillings were sunk. On the left of the picture the CO<sub>2</sub> concentration in a depth of around 80 cm is indicated.



Kontakt: M. Alawi  
(mashal.alawi@gfz-potsdam.de)





Abb. 1: a) Nasse, stark entgasende Mofette (etwa 3 m Durchmesser) in Bublák, b) trockene Mofette (etwa 0,6 m Durchmesser) in der Nähe von Hartoušov (Foto: M. Alawi, GFZ)

Fig. 1: a) A wet, strongly CO<sub>2</sub>-degassing mofette (ca. 3 m in diameter) at Bublák; b) a dry mofette (0.6 m in diameter) near Hartoušov

servoird verantwortlich ist. Dieses Reservoir wird an der Basis des lithosphärischen Mantels in 65 km Tiefe vermutet (Abb. 2).

Als Ursache für die Seismizität im Untersuchungsgebiet wird angenommen, dass es beim Aufstieg der Fluide durch den lithosphärischen Mantel und die Erdkruste in manchen Bereichen zu Fluidporenüberdruck kommt, der zu Spannungs- und Entspannungsreaktionen (Seismizität, seismisch hervorgerufenem Fluidtransport) führt. In den vergangenen drei Jahrzehnten gab es sechs Erdbebenperioden, die sich durch Ereignisse mit einer Lokalmagnitude über Stärke 3 auszeichnen haben (Fischer et al., 2014). Diese Erdbeben treten gewöhnlich in einer Tiefe von 6,6 bis 11 km im Gebiet um Nový Kostel auf, wobei jedoch an der Oberfläche keine größeren Entgasungserscheinungen, wie z. B. Mofetten oder Mineralquellen, beobachtet werden können.

Ganz anders dagegen im etwa 10 km südlich davon gelegenen Bereich um den Ort Hartoušov: Während hier keine seismische

Aktivität registriert wird, zeichnet sich das Gebiet durch starke, CO<sub>2</sub>-dominierte Entgasungen im Oberflächenbereich aus. An einigen Stellen entlang der Počátky-Plesná-Störungszone (eine Bruchstörung innerhalb der Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone) lassen sich tägliche Entgasungsmengen von bis zu 100 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> messen. Diese starken Entgasungen treten jedoch nur im Zentrum des Tals des Flusses Plesná auf. Dies deutet auf den ungefähren Verlauf der Bruchstörungszone hin (Abb. 3).

### Mikrobielle Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

Im Vergleich zu vielen oberflächennahen Ökosystemen ist die Verfügbarkeit von organischen Kohlenstoffquellen innerhalb der von Mikroorganismen besiedelten Bereiche der Oberkruste zwischen etwa 1 und 5 km Tiefe stark eingeschränkt. Die geringe Wasserverfügbarkeit und Diffusion bedingen den geringen Austausch von Nährstoffen und weiteren lebenswichtigen Elementen. Daher laufen mikrobielle Prozesse und Zellteilungs-raten im Bereich der tiefen Biosphäre normalerweise nur sehr langsam ab. Ein besonderes Merkmal von Mikroorganismen ist ihre Fähigkeit, einerseits extrem lange Perioden ohne Substrate unter widrigen Umweltbedingungen zu überdauern und andererseits unverzüglich auf bessere Bedingungen durch Wachstum zu reagieren.

So gibt es Hinweise darauf, dass die mikrobielle Methanbildung nach Schwarmbeben im Eger-Graben beschleunigt wird (Bräuer et al., 2005a). Etwa acht Wochen nach einem Schwarmbeben im Jahr 2000 konnte ein deutlicher Anstieg der Methankonzentration des mikrobiell gebildeten Methans in der Gasphase von Fluiden der Wettin-Quelle bei Bad Brambach beobachtet werden. Aufgrund von Kohlenstoffisotopenmessungen am Methan stellte sich heraus, dass der Anstieg der Methankonzentration durch Zufuhr von mikrobiell gebildetem Methan verursacht worden ist. Eine Erklärung für den Zusammenhang zwischen beschleunigter mikrobieller Methanbildung und der Erdbebenaktivität könnte eine durch das Beben begünstigte Freisetzung von Wasserstoff aus dem Granit sein. Wasserstoff und CO<sub>2</sub> sind die Schlüssel-moleküle der mikrobiellen Methanbildung durch sogenannte methanogene Archaeen. Während CO<sub>2</sub> durch den Transport von CO<sub>2</sub>-reichen Fluiden aus dem lithosphärischen Mantel in ausreichender Konzentration in der Oberkruste vorliegt, könnte Wasserstoff in diesem System ein Minimumfaktor sein, der letztlich die Prozessgeschwindigkeit bestimmt. Der durch seismische Aktivität freigesetzte Wasserstoff dient den methanbildenden Mikroorganismen als primäres Reduktionsmittel. Offen ist hierbei, in welchen Tiefen diese Geo-Bio-Kopplung stattfindet. Aus mikrobiologischer Sicht könnten die CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanäle „Hot Spots“ der mikrobiellen Aktivität sein. Während die Nährstoffzufuhr in großen Tiefen häufig eingeschränkt ist und somit die mikrobielle Aktivität im Vergleich zu oberflächennahen Ökosystemen viel geringer ist, könnten die durchströmenden CO<sub>2</sub>-reichen Fluide Nährstoffe mobilisieren. Ein wichtiger Mechanismus, der die Nährstoffzufuhr

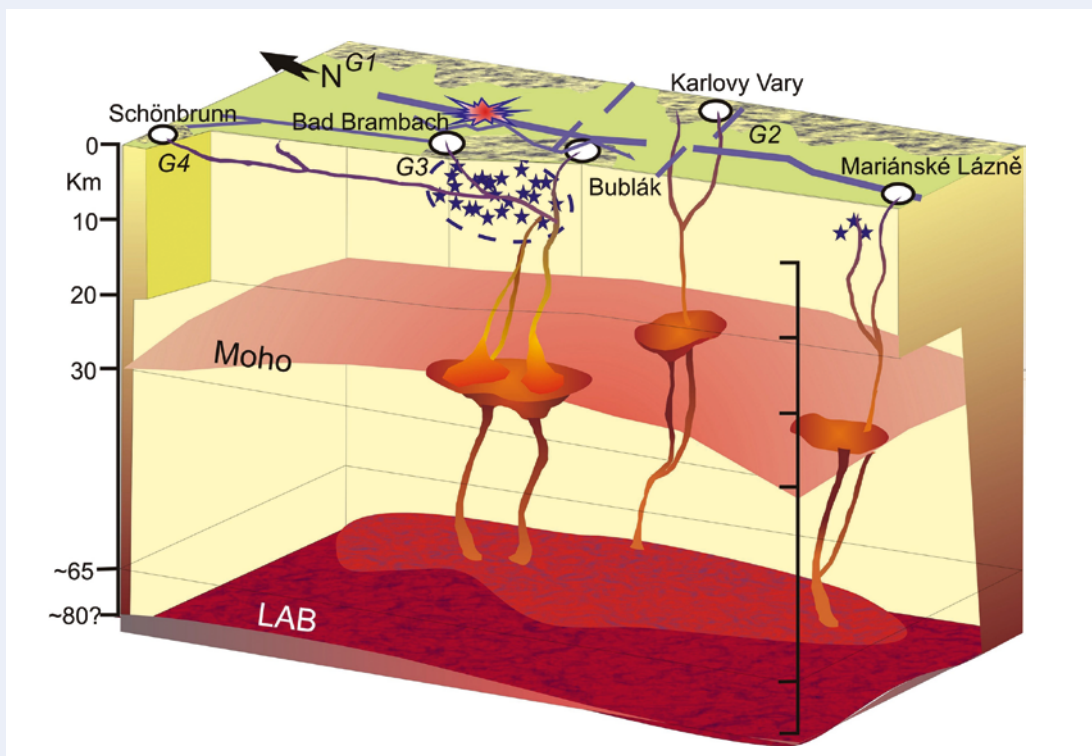


Abb. 2: Schematisches 3D-Modell des CO<sub>2</sub>-reichen Schmelz- und Fluidtransports, der von der Lithosphäre-Asthenosphäre-Grenze (LAB) durch den oberen lithosphärischen Mantel, die Moho und die Erdkruste bis zur Oberfläche reicht. Helium- und Kohlenstoffisotopensignaturen deuten auf verschiedene Magmenkammern in Moho-Tiefe, aber auf ein gemeinsames Reservoir im oberen Mantel hin. Erdbebenaktivität mit Herdtiefen zwischen 6,6 und 11 km sind im Gebiet um Nový Kostel konzentriert (markiert mit rotem Stern), während oberflächennahe CO<sub>2</sub>-Entgasung überwiegend in der Nähe des Bublák- und des Hartoušov-Mofettenfelds zu beobachten ist (verändert nach Bräuer et al., 2011).

Fig. 2: 3D conceptual model of melt and fluid ascent (CO<sub>2</sub>-dominated) from the bulged lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) through the upper lithospheric mantle, Moho and the Earth's crust to the surface. Different isotopic signatures (He, C) hint at multiple magma chambers at Moho depths, but one common, deep reservoir in the Upper Mantle. While earthquakes occur between 6.6 and 11 km depth beneath the Nový Kostel focal zone (reddish star), surface CO<sub>2</sub> degassing occurs mainly at the Bublák and the nearby Hartoušov mofette area (modified after Bräuer et al., 2011).

und Wassermobilität in den CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen verbessert, ist wahrscheinlich die CO<sub>2</sub>-bedingte Ausspülung und Lösung organischer Moleküle aus dem Sediment und Gestein. Daher ist die Untersuchung dieser Fluid-Gestein-Interaktionen von besonderer Bedeutung.

Um diese Geo-Bio-Interaktionen weiter aufzuklären, wird mittels quantitativer Polymerase-Kettenreaktion (qPCR) und DNA-Hochdurchsatzsequenzierung die Zellzahl sowie die Struktur der mikrobiellen Gemeinschaft sehr hoch aufgelöst. Als Vorarbeiten wurden zunächst Wässer von Mineralquellen und nassen Mofetten über einen Zeitraum von anderthalb Jahren beprobt. Hinzu kommen Sedimente aus bis zu 8 m Tiefe, die während einer Bohrkampagne im August 2014 in den Mofetten-

Gebieten Hartoušov und Bublák entnommen wurden. Diese Voruntersuchungen an oberflächennahen Fluiden sollen einen Einblick in die Anpassungsmechanismen und die Diversität der Mikroorganismen liefern. Ferner soll beobachtet werden, ob sich die mikrobielle Gemeinschaft nach einer Erdbebenaktivität hinsichtlich der Quantität oder Diversität verändert. In den Mineralwässern und nassen Mofetten wurde eine beachtliche Anzahl an Mikroorganismen nachgewiesen. Die Zellzahlen liegen je nach Standort zwischen 10<sup>3</sup> bis 10<sup>8</sup> Zellen pro Liter Fluid. Bisherlang wurden etwa 10 Mio. DNA-Sequenzen aus Brunnenwässern und nassen Mofetten erhalten und durch Datenbankanalysen ausgewertet. Es konnten in großen Anteilen sogenannte chemolithoautotrophe Mikroorganismen nachgewiesen werden. Diese Organismen gewinnen ihre Energie durch die Oxidation



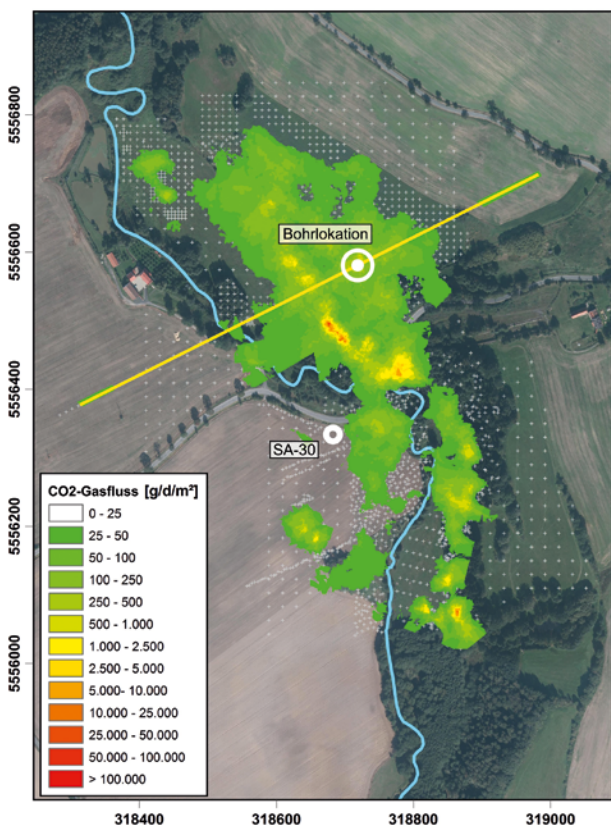


Abb. 3: Dargestellt ist die Entgasung von CO<sub>2</sub> und die Lage der geplanten 120 m tiefen Bohrung im Hartoušov-Mofettenfeld; „SA-30“ zeigt eine Bohrung aus dem Jahr 1957 an. Die orange Linie markiert ein geoelektrisches Profil und Schweremessungen (verändert nach Nickschick et al., 2015).

Fig. 3: Map showing measured CO<sub>2</sub> gas fluxes and the location of the planned 120 m deep drilling in the Hartoušov mofette field. 'SA-30' indicates the position of a geological drilling done in 1957. The orange line marks the location of a geoelectrical profile and gravity measurements (modified after Nickschick et al., 2015).

von anorganischen Molekülen wie Wasserstoff, Schwefel-, Stickstoff- und Eisenverbindungen. Den für das Zellwachstum notwendigen Kohlenstoff beziehen sie aus dem CO<sub>2</sub>. Die nachgewiesenen Bakterien und Archaeen sind anaerob oder mikroaerophil, benötigen also zum Wachstum keinen oder nur Spuren von Sauerstoff. Neben den methanbildenden Archaeen wurde auch eine hohe Anzahl bakterieller Gattungen wie *Sulfurimonas*, *Sulfuricurvum* und *Gallionella*, die am Schwefel- und Eisenkreislauf beteiligt sind, nachgewiesen. Anscheinend sind die autochthonen Mikroorganismen bestens an die erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen angepasst.

Parallel zu den molekularbiologischen Untersuchungen wurden Anreicherungskulturen auf selektiven flüssigen Medien für sulfatreduzierende Bakterien und methanbildende Archaeen angesetzt. Ziel ist es, Reinkulturen von diesen Organismen zu erhalten, um diese im Detail physiologisch und phylogenetisch charakterisieren zu können. In weiterführenden Laborversuchen können dann ausgewählte Umweltparameter, wie beispielsweise die CO<sub>2</sub>- und Wasserstoffkonzentration, variiert werden, um den Einfluss auf die mikrobielle Aktivität zu untersuchen.

## Ausblick

Es zeigt sich, dass die Aufschlüsselung der komplexen Interaktionen zwischen geologischen und biologischen Prozessen in aktiven Bruchstörungszonen ein wichtiger Aspekt bei der Erforschung des Systems Erde darstellt. Nur eine ganzheitliche Erforschung der Prozesse unter Einbeziehung verschiedener Forschungsdisziplinen ermöglicht es uns, den globalen Wandel zu verstehen und Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Derzeit plant das GFZ einen solchen interdisziplinären Forschungsansatz im Rahmen einer 120 m tiefen Bohrung, die im Herbst 2015 im Gebiet des Hartoušov-Mofettenfelds niedergebracht werden soll. Ziel ist es, die Geo-Bio-Kopplung im Untergrund besser zu verstehen und detaillierte Einblicke in die strukturelle und stoffwechselphysiologische Diversität der tiefen Biosphäre zu erlangen. Da die Bohrung bis in das Kristallin reichen wird, spielen hierbei auch die biologische Gesteinsverwitterung und Gestein-Fluid-Wechselwirkungen eine wichtige Rolle. Eine Besonderheit dieser Bohrung ist es, neben der Lage im Entgasungsgebiet, dass sie den Ansprüchen kombinierter mikrobiologischer und geochemischer Untersuchungen gerecht wird. Dies beinhaltet das Kernchen über das gesamte Bohrprofil unter Einsatz von Linern sowie eine Kontaminationskontrolle mittels Tracern, die der anorganischen Bohrspülung zugesetzt werden.

## Literatur

- Bräuer, K., Kämpf, H., Faber, E., Koch, U., Nitzsche, H. M., Strauch, G. (2005a): Seismically triggered microbial methane production relating to the Vogtland - NW Bohemia earthquake swarm period 2000, Central Europe. - *Geochemical Journal*, 39, 5, p. 441-450.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., Strauch, G. (2005b): Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. - *Geophysical Research Letters*, 32, 8, p. L08303.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Koch, U., Strauch, G. (2011): Monthly monitoring of gas and isotope compositions in the free gas phase at degassing locations close to the Novy Kostel focal zone in the western Eger Rift, Czech Republic. - *Chemical Geology*, 290, 3-4, p. 163-176.
- Dahm, T., Hrubcová, P., Fischer, T., Horálek, J., Korn, M., Buske, S., Wagner, D. (2013): Eger Rift ICDP: an observatory for study of non-volcanic, mid-crustal earthquake swarms and accompanying phenomena. - *Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring*, 16, p. 93-99.
- Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryuk, V., Bräuer, K., Kämpf, H. (2014): Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. - *Tectonophysics*, 611, p. 1-27.
- Schreiber, U., Locker-Grütjen, O., Mayer, C. (2012): Hypothesis: origin of life in the deep-reaching tectonic faults. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 42, 1, p. 47-54.
- Nickschick, T., Kämpf, H., Flechsig, C., Mrlina, J., Heinicke, J. (2015 online): CO<sub>2</sub> degassing in the Hartoušov mofette area, western Eger Rift, imaged by CO<sub>2</sub> mapping and geoelectrical and gravity surveys. - *International Journal of Earth Sciences*.
- Weinlich, F., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Tesar, J., Weise, S. M. (1999): An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 21, p. 3653-3671.