

Abschlußbericht für das BMBF-Projekt: SUMSUN

Zuwendungsempfänger: Dr. Matthias Haeckel, Prof. Dr. Klaus Wallmann, IFM-GEOMAR

Förderkennzeichen: 03G0196B

Vorhabenbezeichnung: SO 196 - SUMSUN: Geochemische Untersuchungen der Porenwässer und Sedimente von CO₂ Seeps

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2008 – 28.02.2009

Berichtszeitraum: 01.01.2008 – 28.02.2009

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

Im Geochemie-Teilprojekt sollten Proben des Porenwassers und der Festphase der Oberflächensedimente an CO₂-Austrittsstellen der hydrothermalen Quellen im südlichen Okinawa-Trog genommen werden. Diese sollten dann auf vielfältige Weise geochemisch analysiert werden, um folgende wissenschaftlichen Fragestellungen zu bearbeiten:

- (a) die geologische, mineralogische und geochemische Charakterisierung der Sedimente und Porenwässer an CO₂-Seeps;
- (b) geochemische Untersuchung der oberflächennah vorkommenden CO₂-Hydrate;
- (c) Identifizierung der Herkunft der aufsteigenden Fluide und sekundärer Prozesse während des Aufstiegs;
- (d) Wechselwirkung des CO₂ auf das Porenwasser (Versauerung) und die umliegenden Sedimente (marine Verwitterung);
- (e) Quantifizierung des biogeochemischen Stoffumsatzes im Seep-Gebiet;
- (f) Quantifizierung der CO₂-Freisetzung ins Bodenwasser;

Hintergrund ist, daß die natürlichen CO₂-Seeps im Okinawa-Trog ein natürliches Labor für die Umweltauswirkungen möglicher CO₂-Leckagen von CCS-Speichern darstellen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Probenahme während der Expedition SO196 sowie die biogeochemische Analytik an den Proben an Bord und danach am IFM-GEOMAR wurden mit den bewährten, vorhandenen Geräten durchgeführt. Einige wenige Analysen wurden an

Fremdinstituten ausgeführt, mit denen wir seit vielen Jahren zusammenarbeiten. Die qualitative Interpretation der Daten wurde im Rahmen einer Diplomarbeit angegangen, die numerische Simulation der Daten zur quantitativen Bestimmung von Reaktionsraten und Stoffflüssen erfolgt im Rahmen zweier Doktorarbeiten, eine beschäftigt sich mit der CO₂-induzierten Silikatverwitterung in marinen Sedimenten, die andere mit der Quantifizierung der CO₂-Emissionen als natürliches Beispiel von CO₂-Leckagen von CCS-Speichern. Diese Arbeiten werden im Rahmen des Projektes CLATHRAT, welches sich mit CO₂-Speicherung in marinen Sedimenten auseinandersetzt, am IFM-GEOMAR durchgeführt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der zeitliche Ablauf des Projektes entsprach dem des Antrags. Die geochemischen Analysen am gewonnenen Probenmaterial sind mittlerweile abgeschlossen, die qualitative Interpretation der Daten ist in vollem Gange und eine quantitative Auswertung mittels numerischer Transport-Reaktions-Modellierung ist begonnen worden.

4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der wissenschaftliche und technische Stand wurde ausführlich im Antrag dargestellt. Daher folgt hier nur eine knappe, aktualisierte Zusammenfassung.

Bislang wurden biogeochemische Sediment-Wechselwirkungen von CO₂-reichen Fluiden und die Auswirkungen der Emission auf die marine Umwelt nur sehr selten an natürlichen Systemen untersucht. Diese beschränken sich meist auf die Auswirkungen der Versauerung des Meerwassers auf die Fauna (HALL-SPENCER et al., 2008; TUNNICLIFFE et al., 2009). Die einzigen Felddaten zu mariner Silikatverwitterung stammen von Sedimenten mit "normal" niedrigen CO₂-Konzentrationen und pH-Werten (ALOISI et al., 2004; MAHER et al., 2004; WALLMANN et al., 2008). Im Umfeld der CCS-Initiativen werden geochemische Reaktionen nahezu ausschließlich in Laborversuchen untersucht. Insgesamt beschränken sich auch die Studien von Hydrothermalsystemen meist auf die direkte Untersuchung der austretenden Fluide und selten werden die umliegenden Sedimente und Porenwasser untersucht. Auch zur Kinetik und Thermodynamik natürlicher CO₂-Hydrate ist wenig bekannt und es wird meist auf Daten aus Laborversuchen zurückgegriffen (z. B. DUAN and SUN, 2006; REHDER et al., 2004; SLOAN and KOH, 2007).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte und wird weiter fortgeführt mit den anderen, an der Expedition, beteiligten Institute sowie mit weiteren Instituten im In- und Ausland:

a) National:

- RCOM, Bremen, Dr. Klapp, Prof. Bohrmann: Kristallographische Untersuchung der gewonnenen Gashydrate mittels Synchrotron-XRD am DESY Hamburg
- UFZ, Halle/Leipzig, Dr. Weise: Isotopenanalysen (H, O) am Porenwasser
- MPI, Bremen / AWI, Bremerhaven, Prof. Boetius, Dr. DeBeer: Mikrobiologie, in situ Umsatzraten, Mikroprofilierung im Sediment
- IOW, Warnemünde, Prof. Rehder: Gaszusammensetzung, Temperaturprofile in Sedimenten

b) International:

- IAMSTEC, Japan, Dr. Inagaki: Mikrobiologie der hydrothermalen Sedimente
- Utrecht University, Niederlande, Heleen deWaard: Analyse der Cl-Isotopie des Porenwassers
- POI Valdivostok, Rußland, Dr. Tishchenko: Thermodynamik von Gashydraten
- Université Pierre et Marie Curie Paris, Frankreich, Prof. Saitta: Ab-initio Rechnungen zu Gashydraten und theoretische Auswertung von Raman- und NMR-Spektren

II. Eingehende Darstellung

1. des erzielten Ergebnisses

a. Mineralogie und Geochemie der Sedimente und Porenwässer sowie Herkunft der Fluide und Wechselwirkung mit den Sedimenten:

Während der Expedition SO196 (s. Abb. 1) haben wir die Beprobung von Sedimenten auf das Gebiet Yonaguni Knoll konzentriert, da im zweiten Arbeitsgebiet, Hatoma Knoll, eine Beprobung der Sedimente aufgrund des harten, vulkanischen Untergrunds nicht erfolgreich war. Am Yonaguni Knoll wurde an zwei CO₂-Austrittsstellen, Swallow Chimney und Abyss Vent, und einer Referenzstation ein intensives Kern-Programm mit ROV-Pushcores, TV-Multicorern und Schwereloten durchgeführt.

Grundsätzlich unterscheiden sich die beiden untersuchten Austrittsstellen im Gebiet Yonaguni Knoll durch die vorherrschenden Temperaturgradienten in den Oberflächensedimenten (Abb. 2). Während am Abyss Vent Fluide mit hohen

Temperaturen austreten, so daß das CO₂ sich direkt im Vent-Kanal in überkritischem Zustand befindet, tritt das CO₂ am Swallow Chimney deutlich kälter aus und friert meist bei Kontakt mit Meerwasser als festes Gashydrat aus. Dies spiegelt sich auch in den beobachteten Porenwasser-Profilen wider (Abb. 3+4).

An Abyss Vent sind starke Konzentrationsgradienten in den oberen Zentimetern des Sedimentes zu erkennen, die auf hohe Advektionsraten rückschließen lassen. Die hohen Konzentrationen an H₄SiO₄, NH₄, Li und B nahe am Ausstromkanal (Abb. 3) zeigen die geochemische Signatur des aufsteigenden, hydrothermalen Fluids an, während die Strontium-Isotopie als auch die Alkalinitätswerte von intensiver Wechselwirkung mit den Sedimenten zeugen. Hierbei dominiert die Auflösung von Carbonaten und reaktiven Silikaten. Die Carbonat-Gehalte der Sedimente sind verschwindend gering und auch reaktive Silikate, wie Plagioklas, K-Feldspäte und Pyroxen, sind abgereichert im Vergleich zu den Referenzsedimenten (Abb. 5). Als weiteres Indiz der Silikatverwitterung findet sich eine Abreicherung von Mg in der Festphase, während das Porenwasser im Vergleich zum typischen, hydrothermalen Fluid (Mg²⁺ = 0 mM) erhöhte Mg-Konzentrationen besitzt (Abb. 5).

Die Geochemie und Mineralogie der Sedimente am Swallow Chimney zeigt ähnliche Charakteristika. Im Gegensatz zu Abyss Vent deuten die Porenwasserdaten allerdings auf geringere Advektionsraten hin und es finden sich oberflächennahe Maxima in einigen Daten wieder. Diese lassen sich durch die Fixierung CO₂-reichen Fluids nahe der Sediment-Wasser-Grenze interpretieren, z. B. durch Gashydrat-Bildung. Die sauren, CO₂-reichen Fluide haben dadurch eine längere Reaktionszeit mit dem Sediment und es kommt z. B. zur Ausbildung von Maxima bei gelöstem Ca²⁺, Alkalinität und Silikat, also bei Substanzen, die bei der Verwitterung der Sedimente freigesetzt werden (Abb. 4+5). Die rein hydrothermalen Fluidsignaturen, wie Li und NH₄, zeigen diese Maxima daher nicht (Abb. 4).

An beiden Vents kommt es zu Sulfatreduktion (Abb. 3+4), die wahrscheinlich auch hydrothermal (also durch H₂) dominiert wird, da die mikrobielle Aktivität in den Sedimenten eher gering ist (Mitteilung von A. Boetius, MPI Bremen). Das dabei gebildete H₂S wird partiell bei Kontakt mit kaltem Meerwasser wieder zu elementarem Schwefel oxidiert und bildet teilweise sehr massive S-Präzipitate auf der Sedimentoberfläche (Abb. 5).

Die Porenwasserprofile deuten außerdem die Konvektion von Bodenwasser ins Sediment an, vor allem die Sr- und Li-Isotopie sowie die SO₄-Profile. Die Daten lassen sich durch großskalige Konvektion von Meerwasser durch die Oberflächensedimente (Einflußbereich: 10 bis >100 Meter) interpretieren. Zusätzlich scheint eine kleine Konvektionszelle (10-200 Zentimeter) am Abyss Vent zu existieren, die durch den fokussierten Fluidaustritt gebildet wird. Die Analyse der Daten durch die Transport-Reaktions-Modellierung wird dazu benutzt werden, diese Hypothese weiter zu untersuchen.

Ein erster Artikel mit Ergebnissen zur Auswirkung von CO₂-Emissionen in Tiefsee-Sedimenten ist in Zusammenarbeit mit D. DeBeer und A. Boetius in Vorbereitung. Weitere Veröffentlichungen zu den Ergebnissen sind nach Abschluß der numerischen Simulationen der Daten zu erwarten.

b. Untersuchung natürlicher CO₂-Hydrate:

Während der SO196-Expedition ist es erstmals überhaupt gelungen, Proben von natürlichem Gashydrat zu gewinnen. Diese stammen aus den Oberflächensedimenten um Swallow Chimney. Eine dieser Gashydratproben wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Klapp vom RCOM Bremen mittels Synchrotron-Strahlung auf dessen Kristallographie hin untersucht. Es handelt sich um Gashydrate der Struktur s-I und die Gitterkonstante der untersuchten Probe liegt bei 11,94 Å. Die Käfige sind somit im Vergleich zu reinem s-I-Methanhydrat (Gitterkonstante von nur 11,88 Å) stark aufgeweitet. Der Unterschied läßt sich durch die Besetzung von Käfigen durch das größere CO₂-Molekül (~0.54 nm Durchmesser; CH₄ ist nur ~0.43 nm groß) erklären. Für Struktur s-I liegt die maximal mögliche Gitterkonstante auch bei 11,94 Å. Ein Artikel zur Geochemie von natürlichen CO₂-Hydraten ist in Vorbereitung.

c. Quantifizierung des biogeochemischen Stoffumsatzes:

Bevor eine quantitative Auswertung der CO₂-Emissionen der hydrothermalen Quellen und der Geochemie am Yonaguni Knoll begonnen werden konnte, mußten zunächst verlässliche Algorithmen zur Stabilität und Löslichkeit von CO₂-Hydrat entwickelt werden (Abb. 6). Dies gelang in Kooperation mit Dr. Tishchenko vom POI in Vladivostok, Rußland. Eine Publikation der Ergebnisse in einer internationalen Zeitschrift ist in Vorbereitung.

Die Simulation der geochemischen Prozesse sowie eine regionale Quantifizierung der CO₂-Emissionen haben begonnen und sind Teil einer Doktorarbeit.

2. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erarbeiteten Erkenntnisse und Modelle werden direkt in verschiedene Teilprojekte des vom BMBF und BMWi geförderten Verbundprojektes SUGAR einfließen. Dieses Projektes hat zum Ziel, Strategien und Techniken zum Abbau von natürlichen marinen Methanhydratlagerstätten zu entwickeln. Schwerpunkt ist dabei der Austausch des CH₄ in Gashydraten durch CO₂. Zudem lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auf Fragen und Problematiken bei der Speicherung von CO₂ in marinen Sedimenten und geologischen Formationen anwenden, z.B. in Bezug

auf die Generierung von künstlichen Fluidaustrittsstellen als Folge der Injektion des überkritischen CO₂, der Wechselwirkung des CO₂ mit den Sedimenten bzw. Gesteinen sowie der Bildung von CO₂-Hydraten in marinen Sedimenten als Alternative zu der bislang angedachten überkritischen Speicherung in tiefen geologischen Formationen. Hier besteht Anknüpfung zu dem am IFM-GEOMAR laufenden Projekt CLATHRAT, welches von RWE-DEA und Wintershall gefördert wird. Desweiteren ist das IFM-GEOMAR derzeit dabei ein EU-weites Konsortium zu konstituieren, welches im 7. Rahmenprogramm, Ausschreibung "Ocean of Tomorrow" die Auswirkungen von CO₂-Leckagen auf die marine Umwelt untersuchen will. Erste Ergebnisse aus diesem Projekt haben auch Eingang gefunden in ein Gutachten des Umweltbundesamtes zur CO₂-Speicherung im Meeresgrund, welches vom IFM-GEOMAR in Zusammenarbeit mit Göttinger Juristen erstellt wurde.

3. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Vorhabens wurde kein relevanter Fortschritt bei anderen Stellen bekannt.

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 4.

a) abgeschlossene Diplomarbeiten

Heiko Brenner – Marine Silikatverwitterung im südlichen Okinawa Trog

Moritz Pansegrau – Numerische Modellierung zur Bildung von CO₂-Hydraten

b) Artikel in internationalen Fachzeitschriften

in Vorbereitung:

Tishchenko P., Wong C. S., Johnson W. K., Haeckel M., Wallmann K., Aloisi G., Stability and solubility of CO₂ hydrate in seawater.

Haeckel M., Savy, J.-P., Kossel E., Klapp S., Saitta A. M., Geochemical characterization of a natural CO₂ hydrates.

De Beer D., Haeckel M., Boetius A., Emission of supercritical CO₂ at a deep-sea hydrothermal vent in the Okinawa Trough: A natural analogue for leakage from CO₂ storage sites.

veröffentlicht:

Wallmann K., Böhm F., Haeckel M. (2008) CO₂-Abscheidung und -Speicherung im Meeresuntergrund - Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens, In: Forschungsbericht 20625200 des Umweltbundesamts, Ginzky H., Hahlbeck E. (Redaktion), Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, 337 p.

c) Vorträge und Poster bei internationalen Konferenzen und Instituten:

Tishchenko P., Wong C. S., Johnson W. K., Haeckel M., Wallmann K., Aloisi G., Stability and solubility of CO₂ hydrate in seawater, 8th International Carbon Dioxide Conference (ICDC8), Jena, Germany, 13-19 September 2009.

Haeckel M., Bigalke N., Boetius A., De Beer D., Rehder G., Savy J.P., Sequestering CO₂ in marine sediments – Geochemical insights from a natural case study, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Albrecht C., Aloisi G., Haeckel M., Kutterolf S., Wallmann K., Silicate weathering in anoxic marine sediments: detailed mineralogical investigation, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Bigalke N., Savy J.-P., Aloisi G., Haeckel M., Flux of carbon dioxide across fluid and frozen interfaces: Constraining kinetic controls from high-pressure experiments, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Boetius A., De Beer D., Haeckel M., Mertens C., Inagaki F., Nakamura K., Rehder G., CO₂ leakage in the deep ocean and its effect on benthic fauna, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

De Beer D., Haeckel M., Boetius A., In situ measurements of porewater chemistry in extremely CO₂ rich sediments from a hydrothermal vent, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Savy J.-P., Bigalke N., Aloisi G., Haeckel M., Application of Raman spectroscopy to study the CO₂ dissolution kinetics in water and the growth of CO₂ hydrate, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Scholz F., Hensen C., Meixner A., Reitz A., Haeckel M., Romer R.L., De Lange G., Wallmann K., Lithium isotopes as a tracer for diagenetic processes in deep subsurface sediments, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Ufkes J., Ramette A., Haeckel M., De Beer D., Inagaki F., Boetius A., Impact of high CO₂ concentrations on the structure of microbial communities in marine sediments, Goldschmidt Conference 2009, Davos, Switzerland, 21-26 June 2009.

Haeckel M., CLATHRAT project: CO₂ storage in marine sediments, Offshore Technology Conference, Houston, USA, 4-7 May 2009.

Haeckel M., CLATHRAT project: Combining CH₄ production from gas hydrates and CO₂ storage, 18th International Engineering & Technology Fair (IETF), Bengaluru, India, 23-26 February 2009.

Rehder G., Boetius A., De Beer D., Haeckel M., Inagaki F., Mertens C., Nakamura K., Ratmeyer V., Schneider v. Deimling J., Yanagawa K., and the SO196 Shipboard Scientific Party, Studien zur marinen CO₂-Sequestrierung durch Untersuchung natürlicher hydrothermalen CO₂-Austritte im nördlichen Westpazifik (SUMSUN) , Statusseminar 2009, Meeresforschung mit FS Sonne, Bremerhaven, Germany, 12-13 February 2009.

Haeckel M., Gas hydrates – from CH₄ production to CO₂ storage in marine sediments, RWE DEA Research & Development Day, Hamburg, Germany, 3 December 2008.

Haeckel M., Gas hydrates: potentials for energy production and CO₂ storage, VDI, Erlangen, Germany, 27 November 2008.

Haeckel M., Gas hydrates: potentials for energy production and CO₂ storage, AIESEC Energy Symposium, Jacobs University, Bremen, Germany, 22 November 2008.

Boetius A., de Beer D., Ufkes J., Haeckel M., Inagaki F., Nakamura K., Rehder G., CO₂ leakage in the deep ocean and its effect on biota and biogeochemistry – lessons from natural analogues on CO₂ disposal in the ocean, 2nd International Symposium on "The Ocean in a high-CO₂ World", Monaco, 6-9 October 2008.

Haeckel M., Methane hydrate production and CO₂ sequestration, 2nd Symposium of "The Future Ocean", Workshop "Marine and Coastal Resources: Risks and Law", Kiel, Germany, 6-9 October 2008.

Suess E., Wallmann K., Haeckel M., CCS: Conventional and Innovative Offshore Options, 12th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (ERSCP2008), Berlin, Germany, 23-25 September 2008.

Rehder G., Boetius A., De Beer D., Haeckel M., Inagaki F., Mertens C., Nakamura K., Ratmeyer V., Schneider J., Yanagawa K., Where mother earth runs lab for us – investigating carbon storage in the deep sea by looking at natural CO₂ seepage in the Okinawa Trough hydrothermal system, 9th International Conference on gas in marine sediments, Bremen, Germany, 15-19 September 2008.

Haeckel M., Options for marine CCS. UBA Press Conference, Berlin, Germany, 16-17 June 2008.

Haeckel M., Options for storage of carbon dioxide in marine sediments. 14th German-American Frontiers of Science Symposium, Potsdam, Germany, 11-14 June 2008.

Literaturangaben (außer eigene Publikationen, s. Nr. II.4.)

- Aloisi, G., Wallmann, K., Drews, M., and Bohrmann, G., 2004. Evidence for the submarine weathering of silicate minerals in Black Sea sediments: Possible implications for the marine Li and B cycles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **5**, 1-22.
- Duan, Z. and Sun, R., 2006. A model to predict phase equilibrium of CH₄ and CO₂ clathrate hydrate in aqueous electrolyte solutions. *American Mineralogist* **91**, 1346-1354.
- Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., and Buia, M.-C., 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* **454**, 96-99.
- Maher, K., Paolo, F. J., and Lin, J. C.-F., 2004. Rates of silicate dissolution in deep-sea sediment: In situ measurement using ²³⁴U/²³⁸U of pore fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68**, 4629-4648.
- Rehder, G., Kirby, S. H., Durham, W. B., Stern, L. A., Peltzer, E. T., Pinkston, J., and Brewer, P. G., 2004. Dissolution rates of pure methane hydrate and carbon-dioxide hydrate in undersaturated seawater at 1000-m depth. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68**, 285-292.
- Sloan, E. D. and Koh, C. A., 2007. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Tunnicliffe, V., Davies, K. T. A., Butterfield, D. A., Embley, R. W., Rose, J. M., and Jr, W. W. C., 2009. Survival of mussels in extremely acidic waters on a submarine volcano. *Nature Geoscience* **2**, 344-348.
- Wallmann, K., Aloisi, G., Haeckel, M., Tishchenko, P., Pavlova, G., Greinert, J., Kutteroff, S., and Eisenhauer, A., 2008. Silicate weathering in anoxic marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **72**, 3067-3090.

Abbildungen

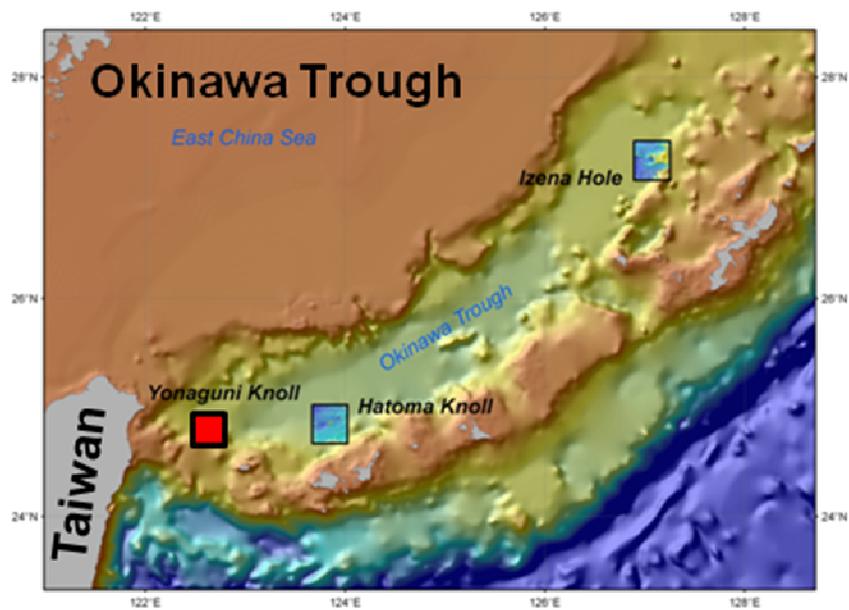


Abb. 1: Arbeitsgebiete Yonaguni Knoll und Hatoma Knoll im südlichen Okinawa Trog.

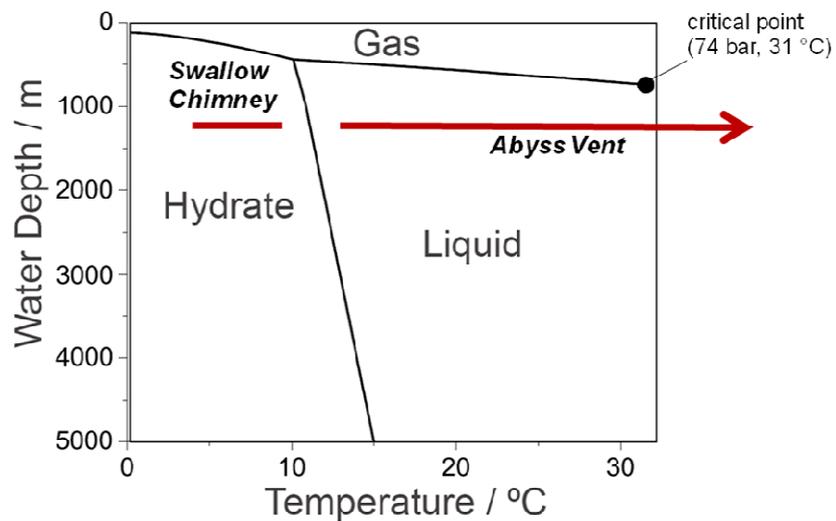


Abb. 2: Phasendiagramm des Systems CO₂-H₂O bei Meerwasser-Salinität von 35. Mit roten Pfeilen sind die Bedingungen an den beiden CO₂-Austrittsstellen im Gebiet Yonaguni Knoll eingezeichnet.

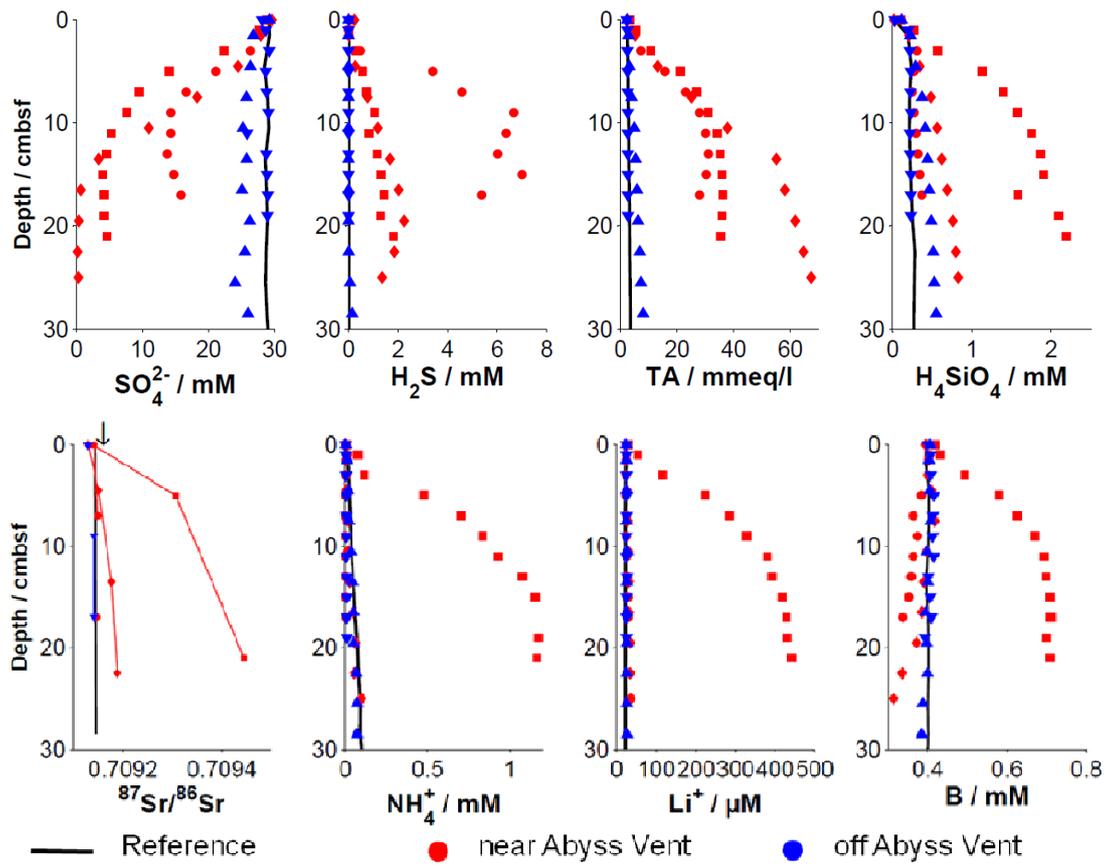


Abb. 3: Einige Konzentrations-Tiefen-Profile im Porenwasser gelöster Substanzen, beobachtet am Abyss Vent, Yonaguni Knoll.

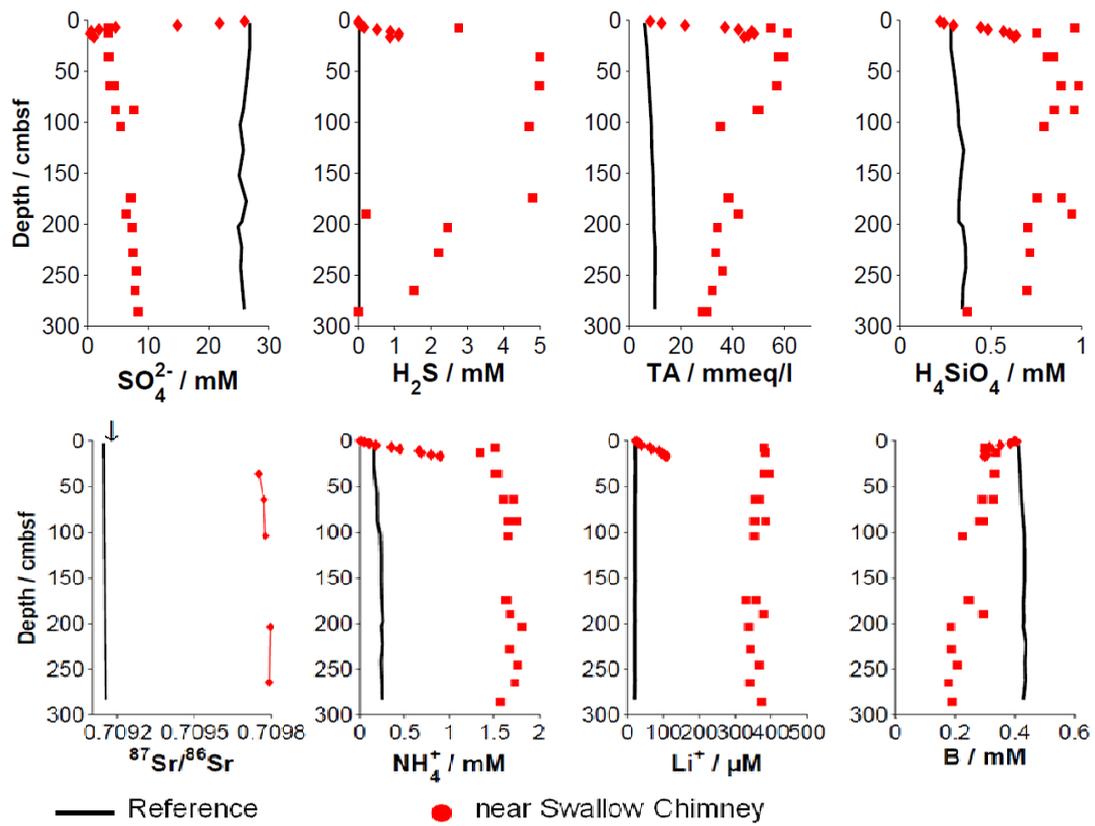


Abb. 4: Einige Konzentrations-Tiefen-Profile im Porenwasser gelöster Substanzen, beobachtet am Swallow Chimney, Yonaguni Knoll.

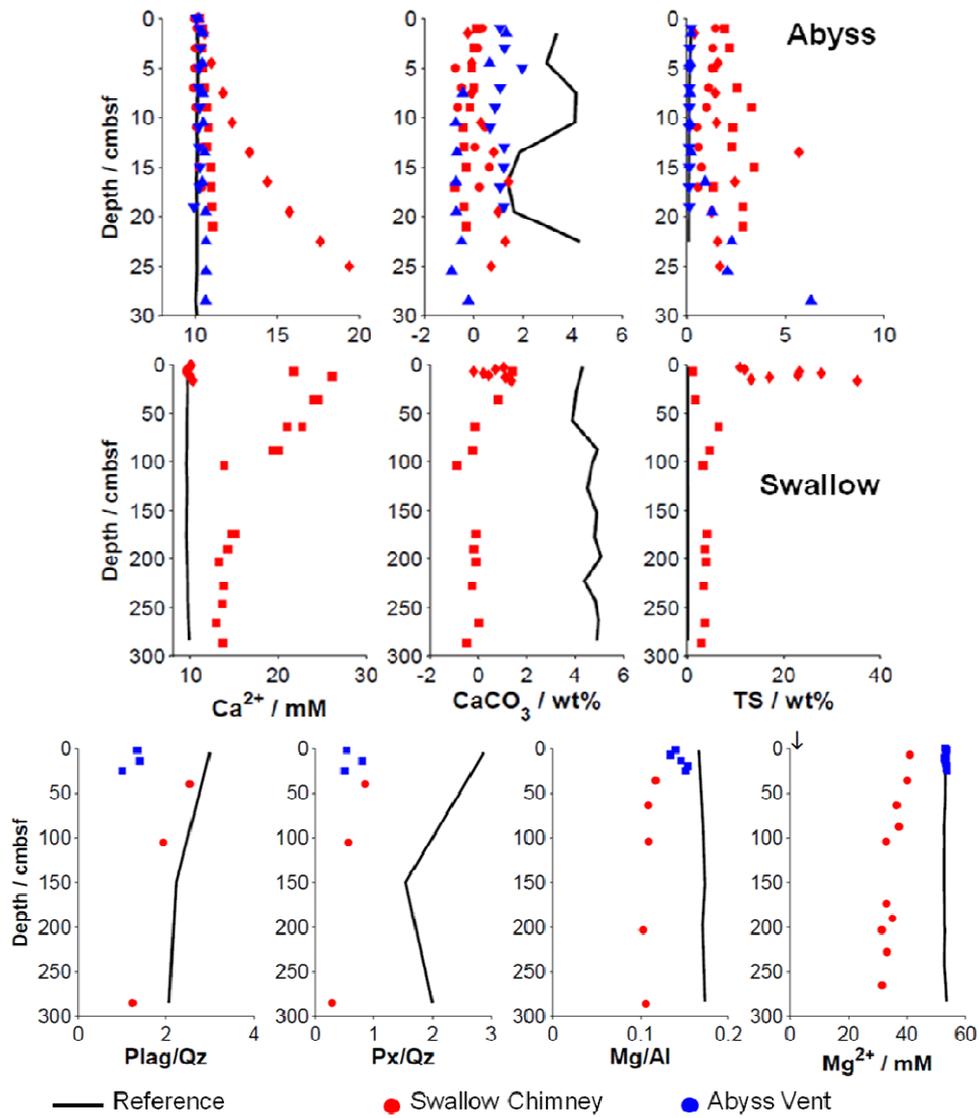


Abb. 5: Einige Konzentrations-Tiefen-Profile in der Festphase und dem Porenwasser.

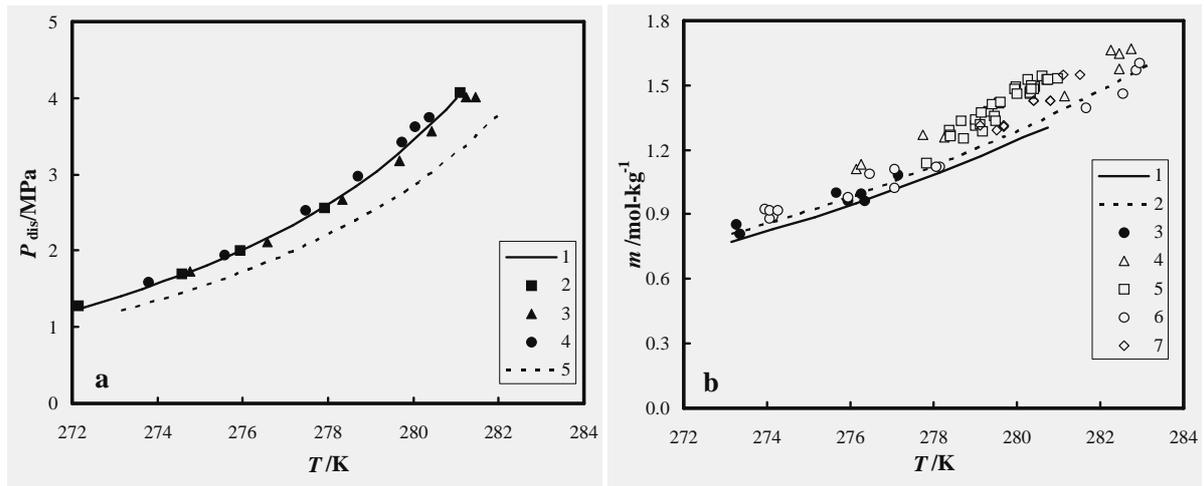


Abb. 6: Berechneter Dissoziationsdruck (links) und Löslichkeit (rechts) von CO₂-Gashydrat in Meerwasser (—) und reinem Wasser (- -) basierend auf den neuen Algorithmen (Tishchenko et al., in Vorbereitung). Symbole repräsentieren Meßwerte aus der Literatur.