

Erwin Suess
Gerhard Bohrmann,
Jens Greinert
Peter Linke
Stephan Lammers
Evelyn Zuleger
Klaus Wallmann
Heiko Sahling
Anke Dählmann
Dirk Rickert
Nikolaus von Mirbach

Methanhydratfund von *FS SONNE* vor der Westküste Nordamerikas

Abstract

Solid methane hydrate was recovered by the *RV SONNE* from the second accretionary ridge behind the deformation front of the Cascadia convergent margin. Fluid vent fields, benthic communities and carbonates were also found along the crest of the ridge. The pure white hydrate occurred intercalated with H₂S-rich sediment and calcium carbonate crusts. Fluids from the vents were sampled by the remotely operated deep-sea vehicle ROPOS from onboard the *RV SONNE*. The fluids emitted at the summit generate a large methane plume in the water column. The tectonic uplift of this ridge implies that convergence pushes extensive gas hydrate deposits gradually upward through the hydrate phase transition, thereby liberating methane and fresh water and forming carbonates. The implications of this newly recognized convergence-controlled dewatering and degassing process for continental margin geology, for budgets of greenhouse gases, and for marine environmental science in general remain to be more fully explored.

1 Methanhydrate

Gashydrate, auch als Clathrate bekannt, sind Feststoffe von einer eisähnlichen Beschaffenheit, in denen Wasser zusammen mit – sonst in der Natur gasförmig vorkommenden – Kohlenwasserstoffen und anderen Gasen in großen Mengen gespeichert sind. Je nach Zusammensetzung bezeichnet man sie zum Beispiel als Methanhydrate, Äthanhydrate oder Mischhydrate. Auch Kohlendioxid- und Schwefelwasserstoff-Hydrate sind aus experimenteller Synthese bekannt [1]. Das Gas wird in einer Käfigstruktur des Wassers festgehalten, deren Volumen Platz für die unterschiedlichen Molekülgrößen bietet (Abbildung 1). Der Feststoff Methanhydrat kommt in der Natur unter erhöhtem Druck und erniedrigten Temperaturen vor [2] (Ab-

bildung 2) und bildet, zum Beispiel unterhalb des Meeresbodens entlang fast aller Kontinentalränder und auf den arktischen Schelfgebieten, enorme Methanvorkommen [3]. Durch das charakteristische Verhalten von Gashydraten gegenüber Schallwellen ist die weltweite Verteilung dieser festen Methanlager, basierend auf seismischen Kartierungen, in großen Zügen bekannt [4, 5].

Die seismische Erfassung ist möglich, weil sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Scherwellen in Meeresbodensedimenten beim Durchdringen eines von Gashydrat zementierten Sedimentpakets schlagartig ändert. Zum einen nimmt die Geschwindigkeit zu, wenn die Wellen aus einer unverfestigten Sedimentlage in eine zementierte Lage übergehen. Zum anderen nimmt sie ab, wenn die Wellen aus einer zementierten Lage in eine solche übergehen, deren Porenraum durch freies Gas gefüllt ist. Dieser zuletzt beschriebene Übergang stellt die Unterkante der Gashydratlage dar und erfolgt je nach Wassertiefe und Temperatur (Abbildung 2) in beträchtlicher Tiefe im Sediment gewöhnlich zwischen 200–500 m [6]. Dieser Übergang ist seit langem als deutliche akustische Anomalie unter der Bezeichnung *Bottom Simulating Reflector* (= BSR) bekannt. Die obere Begrenzung der Gashydratlagen, entsprechend dem eingangs beschriebenen Übergang der Schallwellen, die den Druck- und Temperaturbedingungen bei Wassertiefen von circa 500 m im Ozean entspricht (Abbildung 2), kann weniger gut durch akustische Methoden sichtbar gemacht werden. Dies liegt daran, dass nicht immer ausreichende Mengen an Methan im Sediment vorliegen und deshalb die Oberkante oft diskontinuierlich ausgebildet ist. So fehlt es an einem scharfen Dichteunterschied, der die Schallausbreitung bestimmt [7].

2 Gashydrate an kollidierenden Plattenrändern

Die Akkretionskeile im Nordostpazifik vor den U. S. Bundesstaaten Oregon und Washington (Abbildung 3), die sich als Folge der Kollision zwischen der Juan-de-Fuca-Platte und der nordamerikanischen Platte bilden, zeigen fast alle BSR-Strukturen (Abbildung 4). Ein typisches tektonisches Element der Akkretion sind die aufgewölbten Rücken. Sie enthalten Sedimentpakete unterschiedlicher Mächtigkeit unter dem Meeresboden, deren Porenraum von Methangashydraten gefüllt ist [8]. Durch die kontinuierlich fortschreitende Plattenkonvergenz wölben sich die Rücken ständig auf, und im Untergrund kommt es zu Auf- und Überschiebungen von Sedimentpaketen [9]. Einzelne dieser tektonischen Bewegungsbahnen reichen nach oben bis in den Kammbereich der Rücken und treten sogar am Meeresboden aus (Abbildung 4). Nach unten reichen sie oft hinab in Sedimentschichten, die mit Gashydrat gefüllt sind, zerbrechen diese und dringen in den darunter liegenden Bereich mit freiem Methangas vor. Entlang der Bahnen quellen Fluide und Gase auf und erwärmen dabei die Umgebung. Hierdurch werden Gashydrate in den Sedimentpaketen instabil und setzen Methan frei. Dieses tritt in großen Mengen aus dem Meeresboden aus. Das Gas steigt aus sogenannten Cold Seeps am Meeresboden in die Wassersäule und bildet dort ausgedehnte Methan-Wolken, die durch Boden- und Gezeitenströme verteilt werden (Abbildung 5).

In einer plattentektonischen Provinz mit sich kontinuierlich hebenden Akkretionsrücken, die im Untergrund BSR-Strukturen aufweisen, arbeiteten im vergangenen Sommer Wissenschaftlergruppen des GEOMAR For-

schungszentrums Kiel, der Technischen Universität Freiberg und verschiedener kanadischer und U. S. amerikanischer Institute an Bord des deutschen Forschungsschiffes *Sonne*. Zwei Fahrtabschnitte der Reisen SO 109 und SO 110 waren den Gashydraten, den Fluidaustritten (Cold Seeps) und der Biogeochemie in der Umgebung der Cold-Seeps gewidmet. An Bord des Schiffes befand sich der kanadische Tieftauchroboter ROPOS. Zwischen dem 1. Juni und dem 12. Juli konzentrierten sich die Untersuchungen unter anderem auf den Kammbereich und die Flanken eines gut ausgebildeten Akkretionsrückens vor der Küste Oregons (Abbildung 3). Mit einem bis in 580 m Wassertiefe aufragenden Gipfel fällt dieser Rücken in einen Temperatur- und Druckbereich, in dem der Übergang der festen Gashydratphase zu freiem Methangas liegt (Abbildung 2).

An der Westflanke des Rückens ist der Ausbiss einer steil einfallenden Störung zu erkennen, die aus einer Tiefe von mehr als 400 m bis zur Oberfläche seismisch abgebildet ist (Abbildung 4). Der Ausbiss der Störung ist durch eine Kappe abgedeckt, die aus massiven Karbonatblöcken besteht. Die Blöcke sind mehrere Meter mächtig und erstrecken sich über eine große Fläche. Sie werden als Biotherm-Strukturen bezeichnet [10, 11, 12]. Allerdings handelt es sich vorwiegend um eine anorganisch ausgefällte Mineralvergesellschaftung von Aragonit, Mg-Calcit und Calcit vermischt mit Molluskenschalen (Abbildung 6). Der Karbonat-Kohlenstoff der Präzipitate entstammt oxidiertem Methan, wie aus der C-Isotopie eindeutig erkennbar ist [12, 13]. Die Karbonatstruktur stellt einen bisher mengenmäßig unbekanntesten Restspeicher des über lange Zeit an dieser Stelle entweichenden Methan-Kohlenstoffs dar. Der Kamm des Rückens ist ebenfalls mit aktiven Fluidaustrittsstellen übersät, aus denen Methan aufsteigt. Sie sind an chemoautotrophe Faunen-Vergesellschaftungen und weitere Karbonatbildungen in Form von Schloten, Krusten und Konkretionen erkennbar.

3 Gashydratfund

Die Untersuchungen entlang des Akkretionsrückens bescherte einen der wissenschaftlichen Höhepunkte der *Sonne*-Reisen des Sommers 1996. Es

gelang die Beprobung einer durch Gashydrate zementierten und mit einer chemoautotrophen Fauna belebten Sedimentpartie aus 785 m Wassertiefe mit Hilfe des video-geführten Greifers von *FS Sonne*. Die Wissenschaftler an Bord waren bestens vorbereitet, diesen Fund zu bergen, denn schon beim Hieven durch die Wassersäule konnte ab circa 300 m Tiefe eine starke Entgasung des Sediments im Inneren des Greifers durch die zugeschaltete TV-Kamera beobachtet werden. Die Intensität der Entgasung stieg mit abnehmender Wassertiefe. Unzählige Blasen von Methan quollen aus dem Sediment, eilten dem Greifer voraus und brachen durch die Wasseroberfläche. Die enorme Menge des frei werdenden Gases deutete auf Gashydrat hin, denn aus 1 m³ sich zersetzendem Hydrat werden theoretisch bis zu 164 m³ Methan frei.

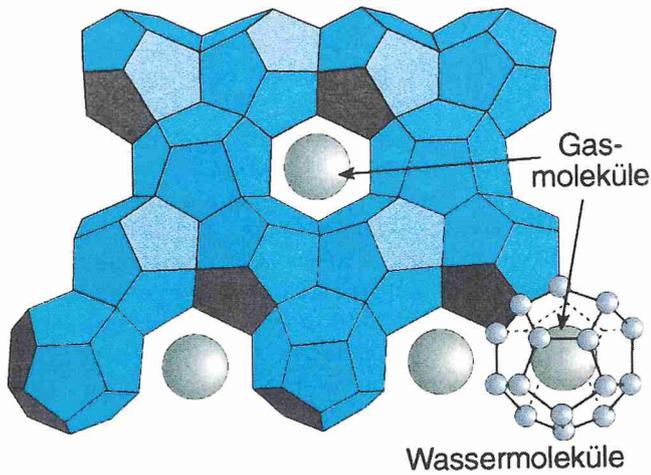
Die Zusammensetzung des Hydrats war zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt. Starker H₂S-Gestank kurz nach Bergen des Gerätes machte jedoch ein Mischhydrat von CH₄ und H₂S wahrscheinlich. Dies konnte später bestätigt werden und war auch schon durch die Bearbeitung der Kerne des Tiefseebohrprogrammes in diesem Gebiet postuliert worden [14]. Die Mannschaft auf *FS Sonne* sowie alle an Deck Tätigen konnten durch vorbereitete Atemschutzmasken bei der Beprobung der H₂S-reichen Hydrate versorgt werden. Die Sedimente zeigten das bekannte, durch entweichendes Gas hervorgerufene, schaumige Gefüge. Auch wurde später eine Verdünnung des im Porenwasser enthaltenen Chloridgehaltes durch salzfreies Hydratwasser nachgewiesen. Es konnten sogar Anteile des ausgesüßten Wassers an den Fluidaustrittsstellen durch gezielte Probenahme mit dem ROPOS-System erhalten werden. Dies war nur möglich durch ein cm-genaues Einführen der Probennehmer in Austrittskanäle mit Hilfe der Manipulatoren des Unterwasserroboters. Beides, schaumiges Sedimentgefüge und ausgesüßtes Wasser, sind deutliche Indizien für die Anwesenheit von Gashydrat [14].

Der Einsatz des TV-Greifers brachte an diesem Fundpunkt des Akkretionsrückens eine geschichtete Wechsellagerung zutage (Abbildung 7). Der Fund sorgte für viel Aufregung an Bord von *FS Sonne* als klar wurde, dass schätzungsweise 30–50 kg Hydrat an Deck gelangt waren. Das Hydrat war schneeweiß und mit dünnen Lagen von Sedi-

ment und Karbonatkrusten durchsetzt (Abbildungen 8 und 9). Es zeigte in Fortsetzung der beobachteten Entgasung in der Wassersäule weiter eine starke Gasentwicklung, hervorgerufen nun durch die schnelle Zersetzung unter den Druck- und Temperaturbedingungen an der Erdoberfläche. In großer Eile wurden deshalb Proben geborgen. Bis zu 50 cm lange Stücke wurden in flüssigem Stickstoff konserviert. Andere wurden aufgeschichtet, um die Feinstrukturen zu dokumentieren (Abbildungen 7 und 8). Die Gasentwicklung war so stark, dass man hören konnte, wie Tausende von Blasen aus dem nassen Sediment platzten. Die Ausbeute an Hydrat war reichlich, so dass nicht genug Kryogefäße vorhanden waren, denn nur unter flüssigem Stickstoff lässt sich diese Substanz für längere Zeit aufbewahren. Schließlich wurden überzählige Stücke angezündet. Dies gedieh zu einem eindrucksvollen Schauspiel, denn das Methan der weißen Hydratbrocken verbrannte langsam, zuerst mit blauer Flamme. Dann wurde das Hydratwasser ausgetrieben und verdampfte und färbte die Flamme stark gelb, offensichtlich durch Natrium aus dem Meerwasser.

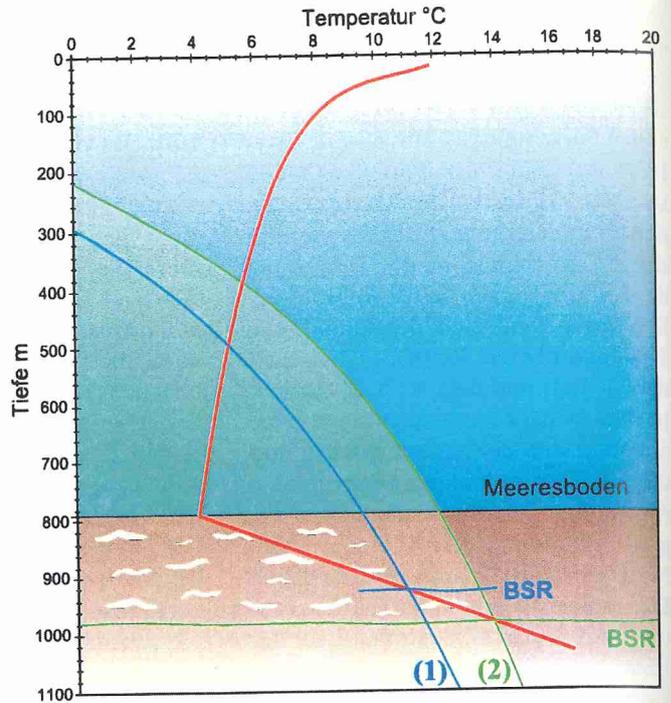
Die Bildung der erstmalig beobachteten und beprobten dünnen Karbonatlagen scheint unmittelbar mit dem Chemismus der Gashydrate und deren Stabilität in Verbindung zu stehen (Abbildung 9). Ähnlich wie bei den Karbonaten der Biotherm-Struktur (Abbildung 6) handelt es sich um Aragonit und Calcit, letzterer mit unterschiedlichen Mengen an Magnesium im Kristallgitter. Die Zusammensetzung der C-Isotope des Karbonates deutet auf eine Herkunft aus Methan hin, und vorläufige Ergebnisse der O-Isotope lassen auf eine enge Wechselwirkung zwischen Hydratzersetzung und Karbonatbildung schließen. Interessant ist auch das Gefüge der Karbonatlagen.

Hydrate und Karbonate finden sich über dem gesamten Kamm des Akkretionsrückens in Wassertiefen von 585 m bis auf 960 m (Abbildung 5). Im nördlichen Abschnitt ist der Kammbereich mit Karbonaten dicht belegt, wie die fälschlich als Biotherm bezeichnete Struktur dokumentiert. Im tieferen Kammbereich ist der Meeresboden mit Hydraten geradezu gepflastert. Dieser bis zu mehreren hundertern von m² zusammenhängender Belag ist häufig von Bakterienmatten besetzt (Abbildung 10). Gemeinschaften von Orga-

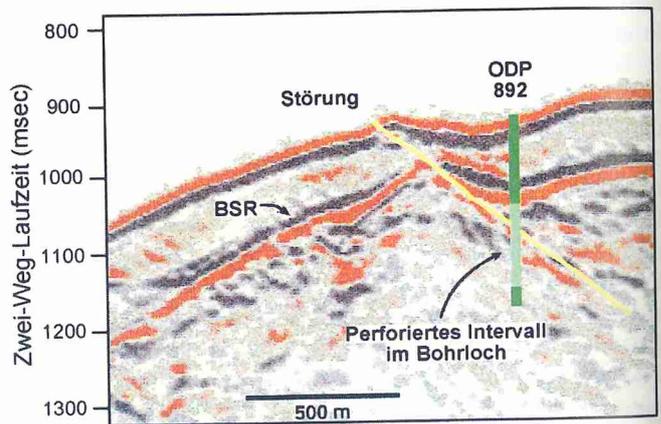


▲ **Abb. 1.** Käfigstruktur eines Hydrats. Die eisähnliche poröse Substanz aus Wasser und Gas bietet Platz für unterschiedliche Gas-moleküle. Methanhydrat enthält theoretisch ein Gasvolumen, das mehr als 160-Mal dem Volumen des Hydrats entspricht (Abbildung nach [1, 3, 16])

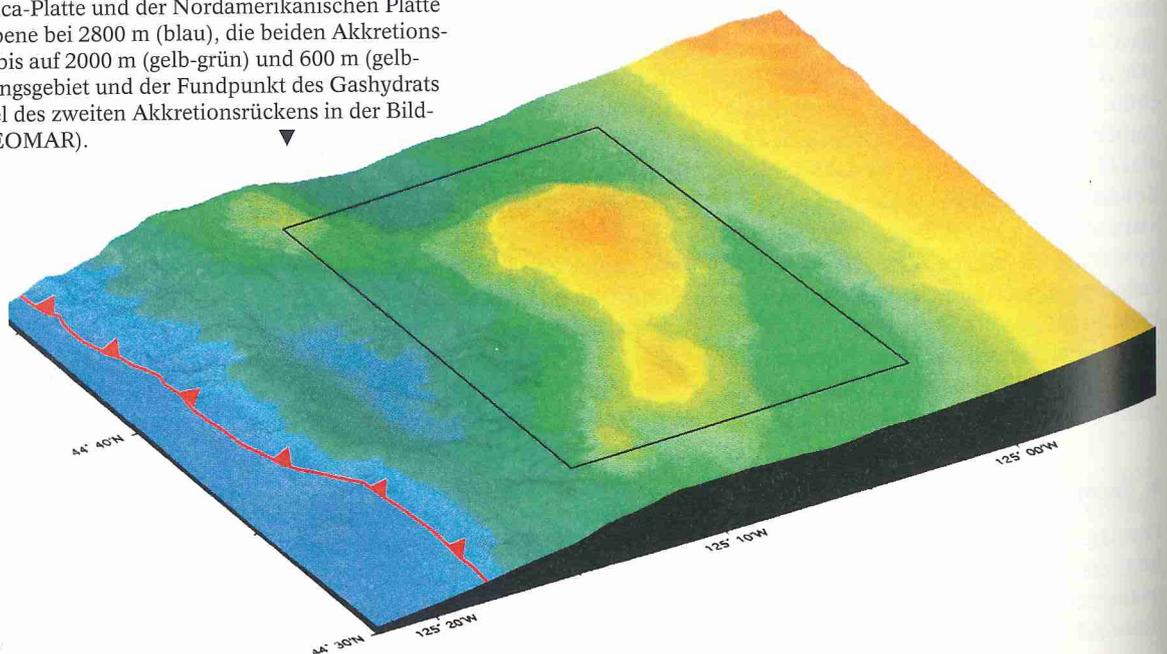
► **Abb. 2.** Stabilität von Methanhydrat in Abhängigkeit von Temperatur (roter Kurvenverlauf) und Druck (Tiefe) in der Wassersäule und im darunter liegenden Sediment. In den Bereichen unter den Stabilitätsgrenzen blau [(1) = reines CH_4] und grün [(2) = $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$] sind Hydrate stabil. Im blauen und roten Bereich kommen freies Methangas und Wasser nebeneinander vor. Die Schnittpunkte des roten Temperaturverlaufs mit der grünen bzw. blauen Stabilitätsgrenze zeigen an, dass z. B. bei 5 °C in Wassertiefen um 380 m und 480 m Gashydrate sich zunächst bilden und bei 980 m bzw. 920 m unterhalb des Meeresbodens sich wieder zersetzen. Diese Grenze ist als Bottom Simulating Reflector (BSR) akustisch kartierbar (Abbildung modifiziert nach [1, 2, 16]).



► **Abb. 4.** Seismisches Tiefenprofil senkrecht zur westlichen Flanke des zweiten Akkretionsrückens; die Tiefenskala ist in Millisekunden akustischer Laufzeit angegeben. Der Bottom Simulating Reflector (BSR) erstreckt sich 80–100 m unterhalb des Meeresbodens und ist entlang der Störung (gelb) deutlich aufgewölbt; hier steigen warme Fluide und Gase auf. ODP 892 markiert die Bohrung des Ocean Drilling Programs mit einer perforierten Bohrlochverrohrung im Bereich der Überschiebung (Abbildung nach [20]).



▼ **Abb. 3.** Tiefenkarte des konvergenten Kontinentalrandes vor Oregon mit Blick von Süden. Die Deformationsfront der Kollision zwischen der Juan-de-Fuca-Platte und der Nordamerikanischen Platte liegt in der Tiefsee-Ebene bei 2800 m (blau), die beiden Akkretionsrücken erheben sich bis auf 2000 m (gelb-grün) und 600 m (gelb-rot). Das Untersuchungsgebiet und der Fundpunkt des Gashydrats sind die beiden Gipfel des zweiten Akkretionsrückens in der Bildmitte (Abbildung: GEOMAR).



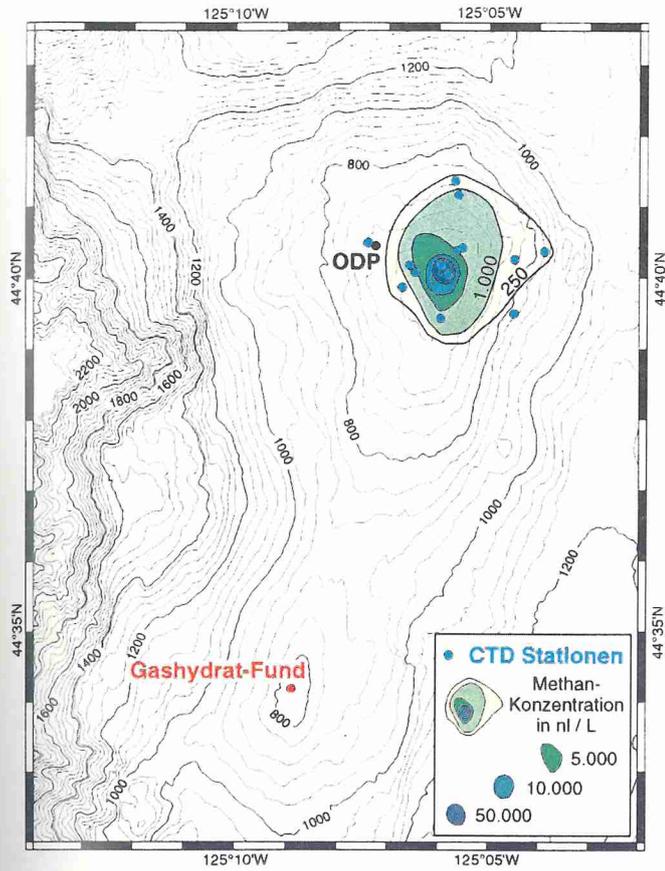


Abb. 5

Die Legenden zu den Abbildungen 5–10 finden Sie auf Seite 198.

Abb. 7 ▼

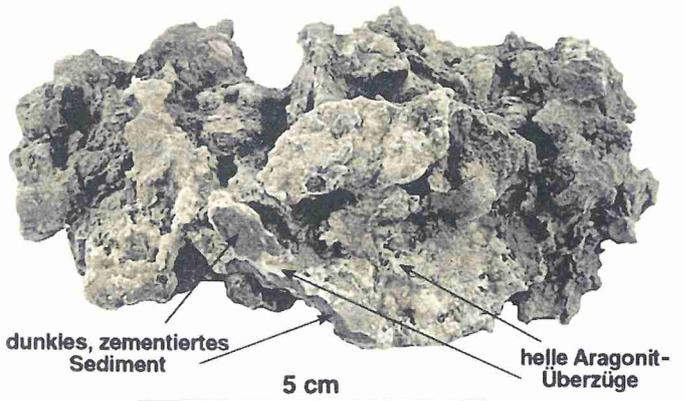
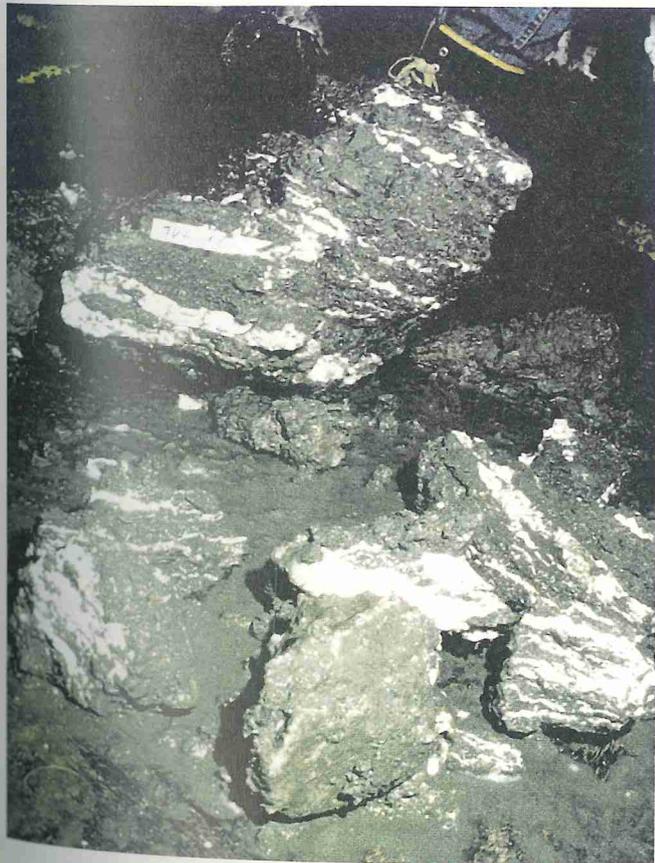


Abb. 9

Abb. 10



Abb. 6

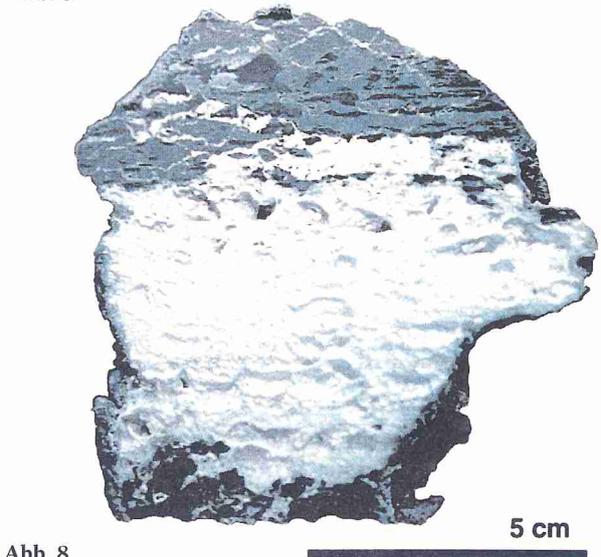


Abb. 5. Tiefenkarte des zweiten Akkretionsrückens. Über dem nördlichen Gipfel steht eine Methanwolke circa 60 m über dem Meeresboden in der Wassersäule mit extrem hohen Konzentrationen (> 50000 nl/L). Auf dem südlichen Gipfel wurde Methanhydrat am Meeresboden beprobt; ODP markiert die Bohrung 892 und den Bereich der Bioherm-Struktur (Abbildung: GEOMAR).

Abb. 6. Bioherm von der westlichen Flanke des zweiten Akkretionsrückens. Authigene Karbonatblöcke mit zementierten Muschelschalen bedecken den Meeresboden. In den Furchen zwischen den Blöcken treten CH_4 - und H_2S -reiche Fluide aus, wie an den gelb- und blau-gefärbten Bakterienmatten erkennbar (Aufnahme: GEOMAR mit Fotoschlitten EXPLOS während Expedition SONNE 110, 1996).

Abb. 7. Wechsellagerung von Gashydrat, Sediment und Karbonat an Deck von FS Sonne. Die weißen Lagen bestehen aus massivem Methanhydrat ohne Sedimenteinschlüsse, was auf eine Ausweitung des Porenraums bei der Kristallisation des Hydrats hindeutet; Kluffüllungen von Gashydrat senkrecht zur Schichtung sind ebenfalls so zu interpretieren. Das Hydrat besteht aus H_2O , CH_4 ,

CO_2 und H_2S ; Maßstab: 10 cm (Aufnahme: GEOMAR während Expedition SONNE 110, 1996).

Abb. 8. Handstück einer Lage von Gashydrat mit Verwachsungsgefüge zum Sediment bestehend aus Einschlüssen und aderförmigem Eindringen von Gashydrat in Sedimentpartien (Aufnahme: GEOMAR während Expedition SONNE 110, 1996).

Abb. 9. Karbonatkruste aus einer Wechsellagerung mit Gashydrat. Die dunklen Sedimentpartien sind durch Karbonat zementiert. Die Oberfläche ist mit einem Überzug aus Aragonit versehen. C-Isotope zeigen an, dass Methan die Quelle des Kohlenstoffs für die Karbonate ist (Aufnahme: GEOMAR).

Abb. 10. Meeresboden am zweiten Akkretionsrücken mit Pflaster aus Gashydrat. Weiße Bakterienmatten bedecken das Hydrat, das mit scharfen Kanten und kleinen Stufen gegenüber dem Meeresboden abgesetzt ist. Stark erodierte Muschelbruchstücke bedecken den Meeresboden; Maßstab: Länge des Voreilgewichtes = 20 cm (Aufnahme: GEOMAR mit Fotoschlitten EXPLOS während Expedition SONNE 110, 1996).

nismen fehlen, wie sie an den Cold-Seeps auf dem nördlichen Kamm angetroffen wurden. Das Hydrat bildet Lagen und Krusten mit scharfen Kanten und niedrigen Stufen, die den besser bekannten Karbonatlagen zum Verwechseln ähnlich sind und deshalb auch bisher nicht als Gashydrate erkannt worden waren.

4 Ausblick

Gashydrate, die an der Meeresbodenoberfläche zugänglich sind, wie hier von FS Sonne geborgen, werden in Zukunft von zunehmendem wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interesse sein. Sie können als Rohstoffquelle in Betracht kommen, da riesige Mengen an Methan in Hydratform gespeichert sind. Schätzungsweise mehr als doppelt so viel Kohlenstoff ist dabei in Form von CH_4 in Gashydraten gebunden, wie in allen bisher bekannten Gas-, Öl- und Kohlevorkommen zusammen genommen [3, 15]. Gashydratvorkommen entlang von Kontinentalrändern oder auf den arktischen Schelfen können durch Umweltveränderungen instabil werden, und das frei werdende Methan gelangt, als eines der wichtigsten Treibhausgase, aus den marinen Sedimenten zuerst in den Ozean und schließlich in die Atmosphäre und beeinflusst so direkt das Klima. Die Kollision im globalen Plattengefüge, wie hier vor Oregon dokumentiert, führt mit ihren schnellen Hebungsraten zu einem Verlassen des Stabilitätsfeldes der Gashydrate. Änderungen der Bodentemperatur können ebenfalls zu

einer Zersetzung von Gashydraten führen. Damit können die aktiven Kontinentalränder und die Schelfgebiete den atmosphärischen Haushalt der Treibhausgase modulieren und greifen so in das Klimageschehen ein [16, 17]. Solche Szenarien von Entgasungen globalen Ausmaßes werden zur Zeit ernsthaft in Betracht gezogen, um C-Isotopenanomalien und extreme klimatische Erwärmung bestimmter Abschnitte der Erdgeschichte, zum Beispiel im Pliozän, an der Paläozän-Eozän Grenze oder auch in der jüngeren Kreide zu erklären [18, 19].

Danksagung

Unseren technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern B. Domeyer, A. Bleyer, M. Schumann, F. Appel und A. Cremer sind wir zu großem Dank verpflichtet für ihren immer tatkräftigen und begeisterten Einsatz auf Expeditionen. Die Forschungsreisen mit FS Sonne wurden vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie finanziert (Projektnummern: 03G0097A, B und 03G110A).

Literatur

- [1] E. D. Sloan: Clathrate Hydrates of Natural Gas; New York: Marcel Dekker, 1990, 641 Seiten.
- [2] G. R. Dickens & M. S. Quinby-Hunt: Methane hydrate stability in seawater; Geophys. Res. Let. 21 (1994) 2115–2118.
- [3] K. A. Kvenvolden & M. A. McMenamin: Hydrates of natural gas: A review of their geologic occurrence; U. S. Geological Survey Circular 825 (1980) 11.

- [4] S. C. Singh, T. A. Minshull & G. D. Spence: Velocity structure of a gas hydrate reflector; Science 260 (1993) 204–207.
- [5] I. A. Pecher, T. A. Minshull, C. S. Singh & R. von Huene: Velocity structure of a bottom simulating reflector off-shore Peru: Results from full waveform inversion; Earth & Planet. Sci. Let. 139 (1996) 459–469.
- [6] N. L. B. Bangs, D. S. Sawyer & X. Golovchenko: Free gas at the base of the gas hydrate zone in the vicinity of the Chile triple junction; Geology 21 (1993) 905–908.
- [7] T. Yuan, R. D. Hyndman, G. D. Spence & B. Desmons: Seismic velocity increase and deep-sea gas hydrate above a bottom simulating reflector on the northern Cascadia continental slope; J. Geophys. Res. 101, B6 (1996) 13,655–13,671.
- [8] R. D. Hyndman & E. E. Davis: A mechanism for the formation of methane hydrate and sea floor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion; J. Geophys. Res. 97 (1992) 7025–7041.
- [9] G. K. Westbrook, B. Carson, R. T. Musgrave & E. Suess: Proceedings of ODP, Scientific Results 146 (1995) 477 Seiten.
- [10] E. Suess, B. Carson, S. D. Ritger, J. C. Moore, M. L. Jones, L. D. Kulm, G. R. Cochrane: Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon; Biol. Soc. Wash. Bull. 6 (1985) 475–484.
- [11] L. D. Kulm, E. Suess, J. C. Moore, B. Carson, B. T. Lewis, S. D. Ritger, D. C. Kadko, T. M. Thornburg, R. W. Embley, W. D. Rugh, G. J. Massoth, G. M. Langseth, G. R. Cochrane, R. L. Scamann: Oregon subduction zone: Venting, fauna, and carbonates; Science 231 (1986) 561–566.
- [12] J. C. Sample & A. Kopf: Isotope geochemistry of syntectonic carbonate cements and veins from the Oregon Margin: Implications for the hydrogeologic evolution of the accretionary wedge; In: B. Carson, G. K. Westbrook, R. J. Musgrave & E. Suess; Proc. ODP, Sci. Results 146 (1995) 137–148.
- [13] S. Ritger, B. Carson & E. Suess: Methane-derived authigenic carbonates formed by subduction-induced pore-water expul-

sion along the Oregon/Washington margin; Geol. Soc. Am. Bull. 98 (1987) 147-156.
 [14] M. Kastner, K. A. Kvenvolden, M. J. Whiticar, A. Camerlenghi & T. D. Lorenzen: Relation between pore fluid chemistry and gas hydrates associated with bottom-simulating reflectors at the Cascadia margin, Sites 889 and 892; In: G. K. Westbrook, B. Carson, R. T. Musgrave & E. Suess, E.: Proc. ODP, Sci. Results 146 (1995) 175-187.
 [15] K. A. Kvenvolden: Methane hydrates and global climate; Global Biogeochemical Cycles, 2/5 (1988) 221-229.

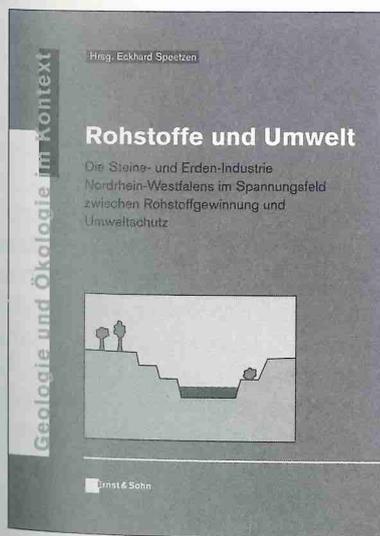
[16] K. A. Kvenvolden: Gas hydrates - geological perspective and global change. Revs. Geoph. 31/2 (1993) 173-187.
 [17] C. K. Paull, W. Ussler & W. P. Dillon: Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrates; Geophys. Res. Let. 18 (1991) 432-434.
 [18] G. R. Dickens, J. R. O'Neil, D. K. Rea & R. M. Owen: Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene; Paleoceanography 10/6 (1995) 965-971.
 [19] J. P. Kennett & L. D. Stott: Abrupt deep

sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of Paleocene; Nature 353 (1991) 319-322.
 [20] B. Carson, G. K. Westbrook et al.: ODP Leg 146 examines fluid flow in Cascadia Margin; EOS 74/31 (1993) 345-347.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Erwin Suess et al., GEOMAR Forschungszentrum für marine Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Wischhofstraße 1-3, D-24148 Kiel.

Geologie und Ökologie im Kontext



Rohstoffe und Umwelt

Die Steine- und Erden-Industrie Nordrhein-Westfalens im Spannungsfeld zwischen Rohstoffgewinnung und Umweltschutz

Geologie und Ökologie im Kontext, Band 2

Herausgegeben von Hubert Wiggering und Roderich Thien

1994. XII, 222 Seiten mit 65 Abbildungen.
 Format: 17 x 24 cm.
 Gebunden DM 118,- / öS 920,- / sFr 112,-
 ISBN 3-433-01521-X

Der vorliegende Band dokumentiert Stand und Entwicklung von Rohstoffgewinnung und Umweltschutz in der Steine- und Erden-Industrie Nordrhein-Westfalens.

In 20 Beiträgen wird ein Überblick über den gesamten Komplex von Vorkommen der Rohstoffe über rechtliche, ökologische und technische Aspekte der Rohstoffgewinnung, der Renaturierung und Folgenutzung von Abbaustellen, der Raumplanung und Rohstoffsicherung bis zu Recycling und Substitution der Steine- und Erden-Rohstoffe aufgezeigt.

Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur
 und technische Wissenschaften GmbH
 Mühlenstraße 33-34, D-13187 Berlin
 Tel. (030) 478 89-284
 Fax (030) 478 89-240
 Ein Unternehmen der VCH-Verlagsgruppe

Ernst & Sohn