

## 4.14 Methanhydrate in arktischen Sedimenten – Einfluss auf Klima und Stabilität der Kontinentalränder

GERHARD BOHRMANN, TINA TREUDE & KLAUS WALLMANN

**Methane hydrates in marine sediments – Impact on climate and stability of continental slopes:** *The Arctic Ocean increasingly gets into the focus of methane hydrate research with respect to Global Warming. In the cold Arctic Ocean, hydrates are stable at relatively shallow water depths, and due to rapidly increasing water temperatures this region is considered to become a major source of atmospheric methane in the near future. But many factors, which are essential to make solid predictions about the fate and consequences of hydrate-related methane in the Arctic, still remain unclear. Uncertainties range from the size of the Arctic methane hydrate inventory to the efficiency of microbes to consume methane that is liberated in sediments and migrating through the water column. A potential collateral impact of massive gas hydrate destabilization could be failures of Arctic continental slopes with resulting mass wasting. Although the correlation between hydrates and mass wasting are still a matter of debate, historic events have been identified and their causes are part of ongoing research. This book chapter will provide an overview of most recent research and discussions about Arctic gas hydrates and its fate in the light of Global Warming.*

Gashydrate sind feste, eisähnliche Verbindungen aus Gasmolekülen und Wasser, welche je nach Wassertemperatur im Ozean und entsprechendem Druck ab 300–900 m Wassertiefe in Form von Methanhydraten vorkommen (BOHRMANN et al. 2001). Neben Methan bilden andere Gase, wie Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und weitere Kohlenwasserstoffe bei höheren Drücken und niedrigen Temperaturen ebenfalls diese feste Verbindung. Aufgrund der geringeren Temperaturen der hohen Breiten können arktische Gashydrate generell in bereits verhältnismäßig geringeren Wassertiefen vorkommen, woraus sich folgende Fragestellungen ergeben: Wie sind Methanhydrate in den Kohlenstoffkreislauf eingebunden und welche Wechselwirkung und Bedeutung haben sie im Klimageschehen? Sind aufgrund der fortschreitenden Klimaveränderungen in der Arktis starke Freisetzungen von Methan aus Gashydraten zu erwarten? Welche Rolle haben Gashydrate bei der Zementierung der Kontinentalhänge und bei der Auslösung von Rutschungen?

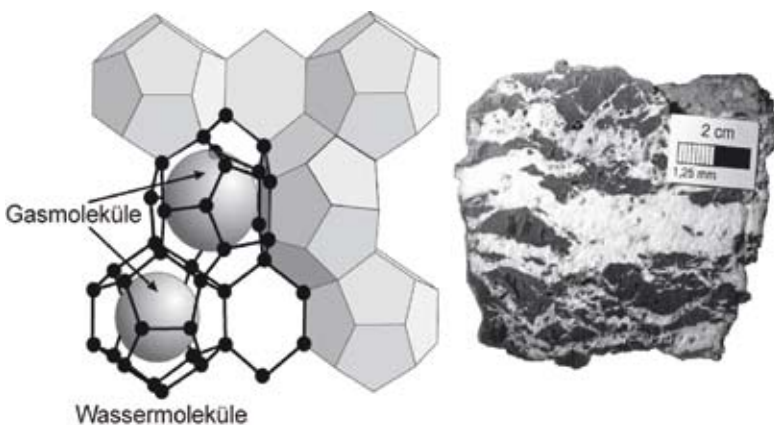
### Struktur und Aufbau der Gashydrate

Gashydrate sind nicht-stöchiometrische Verbindungen, wobei die Wassermoleküle als so genannte Struk-

turmoleküle Käfigstrukturen aufbauen (Abb. 4.14-1), in denen Gasmoleküle als Gastmoleküle eingeschlossen sind (BOHRMANN & TORRES 2006). Sie werden deshalb auch Käfigverbindungen oder Clathrate (von lat. clatratus Käfig) genannt. Generell können Gashydrate bei ihrer Bildung gleichzeitig verschiedene Gasmoleküle abhängig von ihrer Häufigkeit in der Umgebung in getrennten Käfigen einbauen. Neben Methan sind dies v.a.  $H_2S$ ,  $CO_2$  und seltener höhere Kohlenwasserstoffe wie Ethan bis Butan. Bisher sind in der Natur drei unterschiedliche Kristallstrukturen bekannt (SLOAN 2003; Strukturen I und II sowie die Struktur H). Die Struktur der Gashydrate kann dabei als eine Packung von Polyederkäfigen aufgefasst werden, wobei fünf verschiedene Polyederkäfige beteiligt sein können.

### Stabilität und Vorkommen in der Natur

Zur Bildung von natürlichem Gashydrat sind neben der Verfügbarkeit von Gas in Übersättigung und Wasser, die Druck-Temperatur-Bedingungen die entscheidenden Faktoren. Gashydrate sind generell nur bei hohen Drücken und relativ niedrigen Temperaturen stabil (Abb. 4.14-2). Auf der Erde treten überwiegend Methanhydrate auf, die aufgrund des weit verbreiteten



**Abb. 4.14-1:** Schematische Darstellung der Gashydratstruktur I (links). Gashydrat/Sediment-Wechselagerung in einem Handstück aus 780 m Wassertiefe vom Hydratrücken vor der Küste von Oregon (SUESS et al. 1999).

Faulgasen Methan und ihrer physikalischen Stabilitätsbedingungen (Abb. 4.14-2) prinzipiell in Meeres-sedimenten vorkommen wie auch in Permafrostböden der polaren Regionen (KVENVOLDEN 1988). In den Sedimenten der Ozeanböden stammt das Methan zu einem großen Anteil aus dem mikrobiellen Abbau organischen Materials bzw. aus der bakteriellen Kohlenstoffdioxid-Reduktion in so genannten anoxischen Ablagerungen, wie sie ab einer bestimmten Tiefe unter dem Meeresboden in fast allen Sedimentbecken vorkommen. Teilweise wird es aber auch durch thermokatalytische Umwandlungsprozesse in noch tieferen Sedimentschichten gebildet, bevorzugt im Zusammenhang mit Erdöllagerstätten. Die bei weitem höchsten Anteile an Methan entstehen im Bereich der Kontinentalränder, wo durch hohe Planktonproduktion der Ozeane und durch hohe Sedimentationsraten, große Mengen von organischem Material zur Ablagerung kommen und für die Gasbildung zur Verfügung stehen. Daher sind Gashydrate global an allen passiven und aktiven Kontinentalrändern zu finden, aber auch in allen Randmeeren, wie im Schwarzen Meer, im Mittelmeer und im Baikalsee, wo ähnliche Bedingungen herrschen. Vorkommen im Kaspischen Meer und im Golf von Mexiko sind überwiegend an Kohlenwasserstofflagerstätten gebunden.

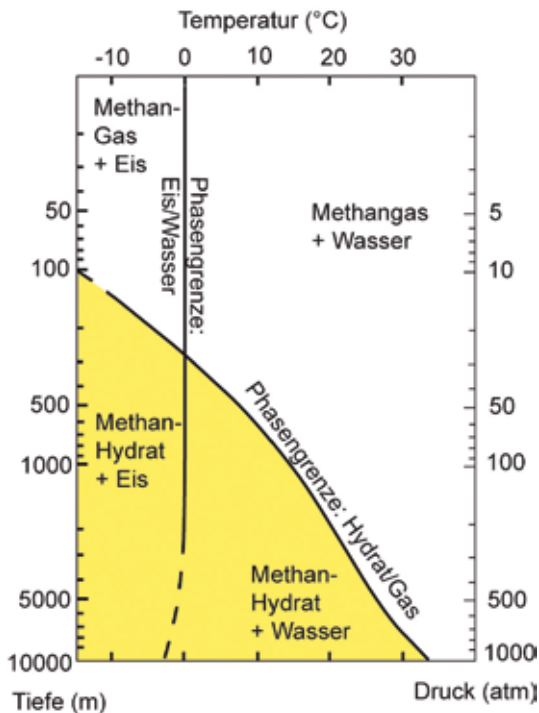


Abb. 4.14-2: Stabilität von Methanhydrat idealer Zusammensetzung (schattiertes Feld) in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (KVENVOLDEN 1988).

Alle bisher bekannten Gashydratvorkommen wurden vom United States Geological Survey zusammengestellt (USGS). Gashydrate wurden bisher an mehr als 25 Lokationen beprobt oder durch geochemische Analysen wie z.B. Chlorid-Anomalien (TRÉHU et al. 2004) im Porenwasser von Sedimenten nachgewiesen. An mindestens 80 Lokationen ist die Existenz von Gashydraten durch die geophysikalische Registrierung eines Boden-simulierenden Reflektors (BSR) nachgewiesen. Der BSR ist ein seismischer Reflektor mit negativem Reflexionskoeffizienten. Er entsteht an der Grenzfläche von hydrathaltigen Sedimenten zu solchen mit freiem Methangas. BSR-Strukturen verlaufen entlang von Isothermen nahezu parallel zur Morphologie des Meeresbodens und folgen nicht dem Verlauf stratigraphischer Horizonte, sondern können geneigte Flächen schneiden (Abb. 4.14-3). Der Reflektor tritt in Tiefen bis zu einigen hundert Metern unterhalb des Meeresbodens auf und zeigt die Untergrenze der Zone der Gashydratstabilität an. Demnach sind Gashydrate oberhalb des BSR zu erwarten, darunter existiert freies Gas. Obwohl noch im Einzelfall bestimmte Detailsignaturen nicht ganz verstanden werden, scheint die Bedeutung des freien Gases unterhalb der Zone der Gashydrate die Amplitudenstärke und Ausbildung der BSR-Signaturen zu bestimmen. Wesentlich ist dabei der Kontrast in den seismischen Geschwindigkeiten. Gashydratzementierte Sedimente haben generell höhere Geschwindigkeiten als unzementierte Ablagerungen. Zusätzlich verringert die Existenz von freiem Gas unterhalb des BSR die Schallgeschwindigkeiten drastisch z.T. auf weniger als die im Meerwasser von 1.500 m/s (Abb. 4.14-3). Der Geschwindigkeitskontrast wird dabei maximiert und führt zur optimalen Ausbildung des BSR. Ist kein freies Gas unterhalb der Gashydratzone vorhanden, so wird mit konventioneller Seismik kein BSR registriert, obwohl Gashydrate vorhanden sind. Diese mit geophysikalischen Methoden nicht zu erkennenden Gashydratvorkommen sind der Grund dafür, dass die weltweiten Vorkommen möglicherweise unterschätzt werden.

Neben der BSR-Verteilung gibt vor allem die geologische Probenahme Aufschluss über Gashydratvorkommen. Dies geschah in der Vergangenheit vorwiegend von Bohrschiffen aus im Rahmen der internationalen Programme DSDP und ODP oder durch oberflächennahe Beprobungen von Forschungsschiffen.

### Gashydratmenge und Klimawirksamkeit

Im Vergleich ausgewählter, wichtiger Speichergrößen der verschiedensten organischen Kohlenstoffvorkommen der Erde ist die Menge an Kohlenstoff, die in Gashydraten existiert, enorm groß. Obwohl es bei der globalen Bilanzierung noch Unsicherheiten gibt und andere Kohlenstoffspeicher unberücksichtigt bleiben,

wird heute allgemein von einer Größenordnung von 500 bis 10.000 Gigatonnen Kohlenstoff ausgegangen, der in Gashydraten gebunden ist. Abweichungen in der Abschätzung der globalen Gashydratmenge gab es in den letzten 25 Jahren vielfach nach oben, wie nach unten. Folgt man den Zahlen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), so sind die geschätzten 10.000 Gt Kohlenstoff ( $G = \text{Giga} = 10^9$ ), die in Gashydraten festliegen, ein häufig genannter Wert. Neuere Arbeiten zeigen jedoch, dass die globale Gashydratmenge bei nur ca. 400-1.500 GtC liegt (BURWICZ et al. 2011, PIÑERO et al. 2013, WALLMANN et al. 2012).

Diese Werte übersteigen die Vorkommen von Erdgas bei weitem und stellen somit ein Potenzial für die Zukunft dar, wenn die konventionellen Erdgasvorkommen ausgeschöpft sein sollten. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass unabhängig von der Treibhausproblematik des Kohlenstoffdioxids aus der Verbrennung des Methans, Fördermethoden entwickelt werden, die einen wirtschaftlichen und umweltschonenden Gashydratabbau sowohl im marinen wie auch im Permafrostbereich ermöglichen. Hierzu gehört auch die Vermeidung von unkontrollierten Emissionen an Methan in die Atmosphäre. Die Gasindustrie verfügt noch über genügend Gasreserven für mehr als eine Generation, so dass nur einzelne Länder, wie Japan, Indien, China, Taiwan und Korea bedeutende Schritte unternehmen, um eine wirtschaftliche Gewinnung von Gas aus Gashydratlagen zu erreichen. Von allen Ländern investiert Japan wohl am meisten in die Exploration der marinen Methanhydratvorkommen. So hat die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) erstmals 2013 im Nankai Trog einen Produktionstest mit einer erstaunlich großen Produktionsrate von 20.000 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Tag durchgeführt. Dieser Erfolg lässt die potentielle Förderung von Methanhydraten in der Zukunft wahrscheinlicher werden. Die Gasgewinnung aus Gashydraten in Permafrostgebieten, wie sie in geringen Mengen bereits in Sibirien existiert, könnte ebenfalls in der näheren Zukunft größere Bedeutung erlangen.

Gelangt Methan in die Atmosphäre, so wirkt es ähnlich wie Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas – allerdings pro Molekül weit stärker – und ist so an der globalen Erwärmung der Atmosphäre beteiligt. Der Kohlenstoff-Speicher der Atmosphäre ist mit 760 Gt zwar von beträchtlicher Größe, kann aber durch Freisetzung von Methan aus den mit 10.000 Gt geschätzten Gashydratvorkommen (Abb. 4.14-4) bei Destabilisierung erheblich moduliert und verändert werden. Arktische Gashydrate gelten aufgrund ihres Vorkommens in bereits relativ geringen Wassertiefen (ab ca. >350 m) als besonders anfällig für die Globale Erwärmung, welche in der Arktis unverhältnismäßig schnell voranschreitet. Über die Ausmaße der potentiellen Methanfreisetzungen aus arktischen Gashydraten wird derzeit viel debattiert. Einige Regionen, wie der sibirische Schelf (SHAKHOVA et al. 2013) oder der Kontinentalhang vor Nord-West Spitzbergen (WESTBROOK et al. 2009), zeigen starke Freisetzungen von Methan aus dem Meeresboden, die in Zusammenhang mit der Auflösung von untermeerischen Permafrost bzw. Gashydraten gebracht werden. Die unmittelbare Verknüpfung zwischen Temperaturerhöhung und Methanfreisetzung bleibt jedoch bislang ungeklärt. Auch numerische Modelle über die Zukunft arktischer und globaler Gashydrate zeigen bisweilen starke Abweichungen. Während in einigen Szenarien katastrophale Freisetzungen von Methan aus Gashydraten postuliert werden (BUFFET & ARCHER 2004), lassen andere Studien vermuten, dass Gashydrate im Meeresboden zeitlich verzögert und nur sehr langsam auf Erwärmungen in der Wassersäule reagieren werden (BIASTOCH et al. 2011). Die verlangsamte Zersetzungsrate der Gashydrate hätte zur Folge, dass sich auch Methan nur allmählich aus dem Meeresboden freisetzen und damit zu keiner drastischen Erhöhung des jährlichen Methanflusses in die Atmosphäre führen würde. Darüber hinaus könnten solch geringe Methanflüsse vermutlich weitestgehend durch mikrobiellen Abbau im Meeresboden (TREUDE et al. 2003) und in der Wassersäule

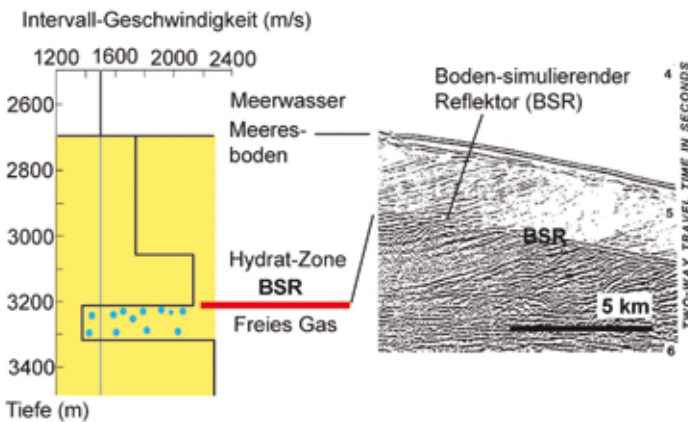


Abb. 4.14-3: Seismische Aufzeichnung von gashydratführenden Sedimenten am Blake-Rücken (rechts; nach PAULL et al. 1996). Unterschiedlich schwache Reflexionen oberhalb des BSR weisen auf eine unterschiedlich starke Füllung des Porenraumes mit Gashydrat hin. Unterhalb des BSRs führt freies Gas im Porenraum zu starken Reflexionen. Das Modell der seismischen Geschwindigkeit (links) zeigt den großen Kontrast der Schalllaufzeiten im Bereich des BSR.

le (VALENTINE et al. 2001) kompensiert werden. Solange das Methan in gelöster Form freigesetzt wird, arbeiten diese mikrobiellen »Methanfilter« sehr effektiv (REEBURGH 2007). Die Situation ändert sich, sobald Methan in gasförmiger Form und in hoher Rate freigesetzt wird. Gasblasen passieren den Methanfilter unangetastet. Daher gilt es herauszufinden, in welcher Wechselwirkung atmosphärische Temperaturerhöhungen und Stabilität von Gashydraten stehen. Eine katastrophale Methanfreisetzung aus Gashydraten könnte die Glazial-Interglazial-Schwankungen beeinflussen, wobei kontinentale Permafrosthydrate auf Grund ihrer Temperatursensibili-

tät positiv und die ozeanischen Gashydrate vorwiegend durch Meeresspiegelanstieg negativ rückkoppeln.

Bei rascher Destabilisierung werden Gashydrate zu wichtigen Einflussgrößen klimatischer Wechsel, deren Zeitskalen bisher noch wenig verstanden sind (DICKENS 2003). In diesem Zusammenhang dient für das globale Verständnis die extreme Anreicherung des stabilen Isotops <sup>12</sup>C im Methan der Gashydrate als wichtiger Tracer.

**Einfluss auf submarine Hangstabilität**

Gashydrate wirken im Porenraum von marinen Sedimenten zunächst wie Zement und rufen dadurch eine hohe Festigkeit und Stabilität des Meeresbodens hervor. Bei einer relativ frühzeitigen Gashydratbildung in noch unverfestigten Ablagerungen verhindern sie allerdings durch die Zementierung eine mit zunehmendem lithostatischem Druck erhöhte Verfestigung. Werden nun durch Druck/Temperatur-Schwankungen die porenfüllenden Gashydrate zersetzt, kommt es zu einer starken Abnahme der Bodenfestigkeit, und submarine Rutschungen können die Folge sein. An allen Kontinentalrändern lassen sich Rutschungen unterschiedlicher Größenordnung nachweisen, die in zahlreichen Fällen mit Gashydratvorkommen korrelieren. Ein unmittelbarer Beleg für die Auslösung von Rutschungen durch Gashydratzersetzung lässt sich zwar nur schwer finden, viele Beobachtungen weisen jedoch auf einen ursächlichen Zusammenhang hin (Abb. 4.14-5). So lassen sich im Umfeld der Abrisskanten von Rutschungskörpern fast immer Spuren von Gas- und Fluidtransport erkennen. Am oberen Kontinentalrand sind außerdem größere Hangneigungen von >4 Grad zu verzeichnen, sodass bei Stabilitätsverlusten, wie durch Gashydratfreisetzung verursacht, ein verstärkter gravitativer Transport einsetzen kann. Die zunehmende Volumenausdehnung der aus dem Gashydrat freiwerdenden Gasmenge bei abnehmender Wassertiefe scheint hierbei eine große Rolle zu spielen (Abb. 4.14-6). So ist in ca. 650 m Wassertiefe bei einer Gashydratzersetzung das Volumen an freiwerdendem Gas und Wasser fast dreimal so hoch wie das eigentliche Gashydratvolumen. Der enorme Porendruck, der bei der Gashydratzersetzung am oberen Kontinentalrand durch diese Volumenausdehnung entsteht, führt zu einer starken Abnahme der Festigkeit und der vorhandene große Porenraum zu einer hohen Deformierbarkeit.

Über die kurzzeitig freiwerdenden mechanischen Energien, die Methanmengen sowie die langfristigen Auswirkungen auf den Lebensraum lässt sich gegenwärtig jedoch nur spekulieren. Von der so genannten Storegga-Rutschung (Abb. 4.14-5) am Kontinentalhang vor Südnorwegen ist eine Flutwelle durch Ablagerungen in norwegischen Fjorden bekannt. Die Storegga-Rutschung ist mit einem Gesamtvolumen von 5.608 km<sup>3</sup> eine der größten bisher bekannten Rutschungen. Sie erfolgte

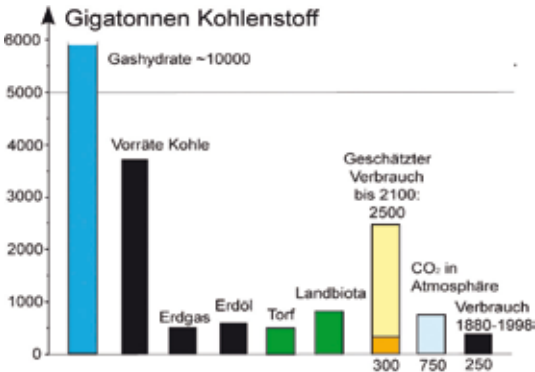


Abb.4.14-4: Mengenanteile von organischem Kohlenstoff einzelner ausgewiesener Speichergrößen der Erde nach Angaben des IPCC (2001).

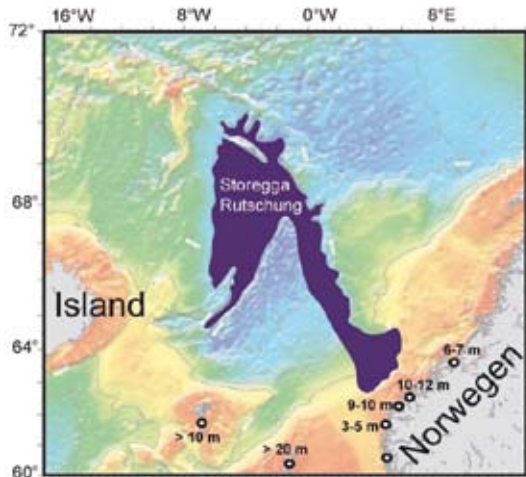
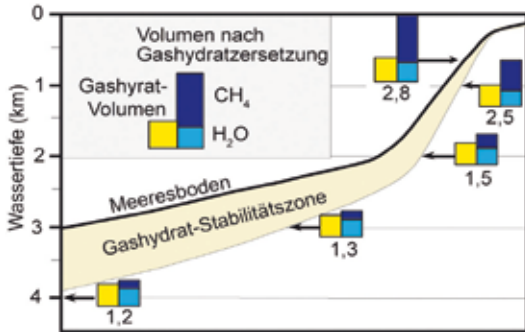


Abb. 4.14-5: Die Storegga Rutschung am norwegischen Kontinentalhang ist eine der größten Rutschungen. Das Rutschungsereignis vor 8.000 Jahren führte zu einer Flutwelle, die im Bereich angrenzender Küsten zu einer Wellenhöhe bis zu 20 m geführt hat. Die Kreise und Zahlenangaben markieren Stellen geologischer Dokumentation der aufgelaufenen Flutwellenhöhe (nach BONDEVIK et al. 2003). Wie mehrere Autoren gezeigt haben, können diese Rutschungen nicht durch Gashydrat-Zersetzung ausgelöst werden. Für tsunamigene Rutschungen sind andere Prozesse wie Erdbeben und postglaziale Hebungen verantwortlich.





**Abb. 4.14-6:** Volumenausdehnung bei Gashydratzersetzung; Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone im Meeresboden (unter Annahme eines geothermischen Gradienten von 30 °C/km), in Abhängigkeit von der Wassertiefe (dicke Linie). Die Balkendiagramme zeigen die ebenfalls tiefenabhängige Volumenzunahme (Zahlenangabe = Faktor der Volumenzunahme) eines konstanten Gashydratvolumens bei Zersetzung.

vor 8.000, wobei eine mächtige Flutwelle ausgelöst wurde. Die geologischen Ablagerungen der Storrega-Flutwelle dokumentieren entlang der Küste Süd-Norwegens, dass die Flutwelle eine Mindesthöhe von 10–12 m über dem damaligen Meeresspiegel hatte. Eine Wellenhöhe von mehr als 20 m sind auf den Shetland Inseln durch Ablagerungen des Tsunami bekannt geworden (BONDEVİK et al. 2004). Je nach Küstenmorphologie und Dichte der Bevölkerung könnten derartige Flutwellen heute erheblichen Schaden anrichten, ähnlich wie aktuell an den Küstenzonen des Indischen Ozeans als Folge eines gewaltigen untermeerischen Bebens.

## Fazit und Ausblick

Obwohl Gashydrate schon fast 200 Jahren bekannt sind, tritt ihre Bedeutung auf unserem Planeten erst so langsam in unser Bewusstsein. Im Gegensatz von zunächst prinzipiellen Fragestellungen, wie nach dem Struktur- und ihrer Stabilität stehen heute mehr globale Fragen, wie nach der Klimabeeinflussung und der einer möglichen rohstofflichen Nutzung der Gashydrate im Zentrum. Hierbei könnte die Arktis eine zentrale Rolle spielen, da ihre Gashydrate aufgrund des flachen Vorkommens als besonders anfällig für Temperaturveränderungen wie auch als besonders attraktiv für den kommerzielle Abbau gelten - nicht zuletzt auch durch die zunehmende eisfreie Periode an den arktischen Kontinentalrändern. Die Forschungsanstrengungen einzelner Länder, sowie die zahlreichen internationalen Forschungsinitiativen lassen uns in den nächsten Jahrzehnten noch auf spannende neue Erkenntnisse hoffen. Allerdings sind sich Forscher weitestgehend einig, dass uns aufgrund der thermischen Trägheit der Gashydrate in naher Zukunft keine katastrophalen Freisetzungen von Methan drohen.

## Literatur

- BIASTOCH, A., T. TREUDE, L. H. RÜPKE, U. RIEBESELL, C. ROTH, E. B. BURWICZ, W. PARK, M. LATIF, C. W. BÖHNING, G. MADEC & K. WALLMANN (2011): Rising arctic ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification. *Geophys. Res. Lett.* 38: L08602. DOI:08610.01029/02011GL047222.
- BONDEVİK, S., MANGERUD, J., DAWSON, S., DAWSON, A. & O. LOHNE (2003): Record-breaking height for 8000-year-old tsunami in the North Atlantic. *EOS*, 84 (31): 289-300.
- BOHRMANN G. & M. TORRES (2006): Gas hydrates in marine sediments. In Schulz HD and Zabel M., *Marine Geochemistry*. 481- 512, Springer.
- BOHRMANN, G., GREINERT, J. & E. SUESS (2001): Methanhydrate. *Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik*, 7, Ergänzungslieferung, 10/01, 1-7, Ecomend Verlag.
- BUFFETT, B. & D. ARCHER (2004): Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 227: 185-199.
- BURWICZ, E. B., RÜPKE, L. H. & K. WALLMANN (2011): Estimation of the global amount of submarine gas hydrates formed via microbial methane formation based on numerical reaction-transport modeling and a novel parameterization of Holocene sedimentation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75.
- DICKENS, G. R. (2003): Rethinking the carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor. *Earth and Planetary Science Letters*, 213: 169-183.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The scientific base....*
- KVENVOLDEN, K. (1988): Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology* 71, 41-51.
- PAULL, C. K., MATSUMOTO, R., WALLACE, P. J. et al. (Hrsg.) (1996): *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Report*, 164: College Station, Texas, Ocean Drilling Program.
- PINERO, E., MARQUARDT, M., HENSEN, C., HAECKEL, M. & K. WALLMANN (2013): Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. *Biogeosciences* 10, 959-975.
- REEBURGH, W. S. (2007): Oceanic methane biogeochemistry. *Chem. Rev.* 107(2): 486-513.
- SHAKHOVA, N., I. SEMILETOV, I. LEIFER, V. SERGIENKO, A. SALLYUK, D. KOSMACH, D. CHERNYKH, C. STUBBS, D. NICOLSKY, V. TUMSKOY & Ö. GUSTAFSSON (2013): Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience* DOI: 10.1038/NNGEO2007.
- SUESS, E., G. BOHRMANN, J. GREINERT & E. LAUSCH (1999): Brennendes Eis - Methanhydrat amMeeresgrund. *Spektrum der Wissenschaft* 6, 62-73.
- SLOAN, E. D. (2003): Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. *Nature* 426: 353-359.
- TREHU, A. M., LONG, P. E., TORRES, M., BOHRMANN, G., RE, COLLETT, T. S., GOLDBERG, D. S., MILKOV, A. V., RIEDEL, M., SCHULTHEISS, P., BANGS, N. L., BARR, S. R., BOROWSKI, W. S., CLAYPOOL, G. E., DELWICHE, M. E., DICKENS, G. R., GRACIA, E., GUERIN, G., HOLLAND, M., JOHNSON, J. E., LEE, Y.-J., LIU, C.-S., SU, X., TEICHERT, B. TOMARU, H. VANNESTE, M. WATANABE & J. L. WEINBERGER (2004): Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204. *Earth and Planetary Science Letters* 222: 845-862.
- TREUDE, T., A. BOETIUS, K. KNITTEL, K. WALLMANN & B. B. JØRGENSEN (2003): Anaerobic oxidation of methane above gas hydrates at Hydrate Ridge, NE Pacific Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 264: 1-14.
- VALENTINE, D. L., D. C. BLANTON, W. S. REEBURGH & M. KASTNER (2001): Water column methane oxidation adjacent to an area of active gas hydrate dissociation, Eel River Basin. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65: 2633-2640.
- WALLMANN, K., PINERO, E., BURWICZ, E., HAECKEL, M., HENSEN, C., DALE, A. & L. RUEPKE (2012): The global inventory of methane hydrate in marine sediments: A theoretical approach. *Energies* 5, 2449-2498.
- WESTBROOK, G. K., K. E. THATCHER, E. J. ROHLING, A. M. PIOTROWSKI, H. PALIKE, A. H. OSBORNE, E. G. NISBET, T. A. MINSHULL, M. LANOISELLE, R. H. JAMES, V. HÜHNERBACH, D. GREEN, R. E. FISHER, A. J. CROCKER, A. CHABERT, C. BOLTON, A. BESZCZYNSKA-MÖLLER, C. BERNDT & A. AQUILINA (2009): Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin. *Geophys. Res. Lett.* 36: doi:10.1029/2009GL039191.

## Kontakt:

Prof. Dr. Gerhard Bohrmann  
 MÄRUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Bremen  
 Prof. Dr. Tina Treude  
 Prof. Dr. Klaus Wallmann  
 GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung, Kiel  
 gbohrmann@marum.de