3 Energie aus brennendem Eis

> Im Meeresboden lagern nicht nur Mineralien, sondern auch große Mengen an Methanhydrat. Manche Staaten hoffen, sich mit der Erschließung der Gashydratvorkommen vor der eigenen Küste von Energieimporten unabhängig machen zu können. Noch aber fehlt es an Fördertechnik. Zudem muss geklärt werden, welche Gefahren der Methanhydratabbau für das Klima und die Meereslebensräume mit sich bringt.

Vom Plankton zum Hydrat

> Methanhydrat kennt man bereits seit den 1930er Jahren. Erst seit gut 10 Jahren aber wird die Substanz als ernst zu nehmender fossiler Energieträger der Zukunft diskutiert. Inzwischen ist es gelungen, die weltweit verfügbare Menge recht genau einzuschätzen. Jetzt versuchen Forscher, die ertragreichsten Vorkommen zu finden.

Die Entdeckung eines neuen Rohstoffs

Methan ist ein weitverbreitetes Molekül, das für viele Menschen alltäglich ist: Es ist der brennbare Hauptbestandteil von Erdgas. Je nach Qualität besteht Erdgas zu 75 bis 99 Prozent aus Methan. Weitere Inhaltsstoffe sind die Gase Ethan, Propan oder Schwefelwasserstoff. Bei Raumtemperatur und normalem Umgebungsdruck an der Erdoberfläche ist Methan gasförmig. Bei Kälte und hohen Drücken aber kann es mit Wasser eisähnliches, festes Methanhydrat bilden. Im Hydrat ist das Methan rund 160-mal dichter gepackt als im Erdgas. Das bedeutet, dass 1 Kubikmeter Hydrat rund 160 Kubikmeter Gas enthält. Beim Zerfall des Hydrats wird also viel Methangas frei.

Diese Methanhydrate kennt man seit den 1930er Jahren. Damals klagten Erdgasversorger darüber, dass ihnen bei Kälte die Erdgasleitungen und -ventile zufroren. Erstaunlich war, dass sich die Leitungen mitunter bereits bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser zusetzten. Die Verstopfungen konnten also nicht durch gewöhnliches Wassereis entstanden sein. Die Forscher fanden heraus, dass es sich bei den eisähnlichen Ablagerungen um eine Substanz aus Methan und Wasser handelte. Fortan mischte man dem Erdgas Zusätze bei, um die unerwünschte Methanhydratbildung zu verhindern. Zunächst hielt man Methanhydrat für ein Phänomen, das nur in Industrieanlagen auftritt. Doch in den 1960er Jahren sorgten russische Forscher für eine kleine Sensation. Bei einer Bohrung förderten sie unbeabsichtigt Methanhydratbrocken an die Erdoberfläche.

Damit lieferten sie den Beweis, dass Methanhydrat auch auf natürliche Weise entstehen kann. Kurze Zeit später wiesen US-Forscher Methanhydrat auch im Permafrostboden Alaskas nach. Sie schlossen daraus, dass Methanhydrat sehr verbreitet sein könnte, und machten sich weltweit auf die Suche – auch in den Ozeanen. 1971 wurden die ersten großen Vorkommen am Grund des Schwarzen Meeres entdeckt und Anfang der 1980er Jahre vor der Küste Alaskas. Heute weiß man, dass Methanhydrate in allen Meeren und vor allem an den Rändern der Kontinente vorkommen.

Man schätzt, dass in den Hydraten im Meeresboden rund 10-mal mehr Methan gespeichert ist als in konventionellen Erdgaslagerstätten. Methanhydrat ist damit eine vielversprechende fossile Energiequelle der Zukunft. Seit etwa 10 Jahren wird die Erkundung der Methanhydratlagerstätten im Meer daher intensiv vorangetrieben. Interesse haben vor allem Staaten wie Japan, Südkorea oder Taiwan. Sie verfügen kaum über eigene fossile Energiereserven und müssen Gas, Kohle und Öl in großen Mengen importieren. Mit Methanhydraten aus den eigenen Hoheitsgewässern könnten sie sich von Importen und den zuletzt stark gestiegenen Energiepreisen ein Stück weit unabhängig machen.

Erst Methan, dann Hydrat

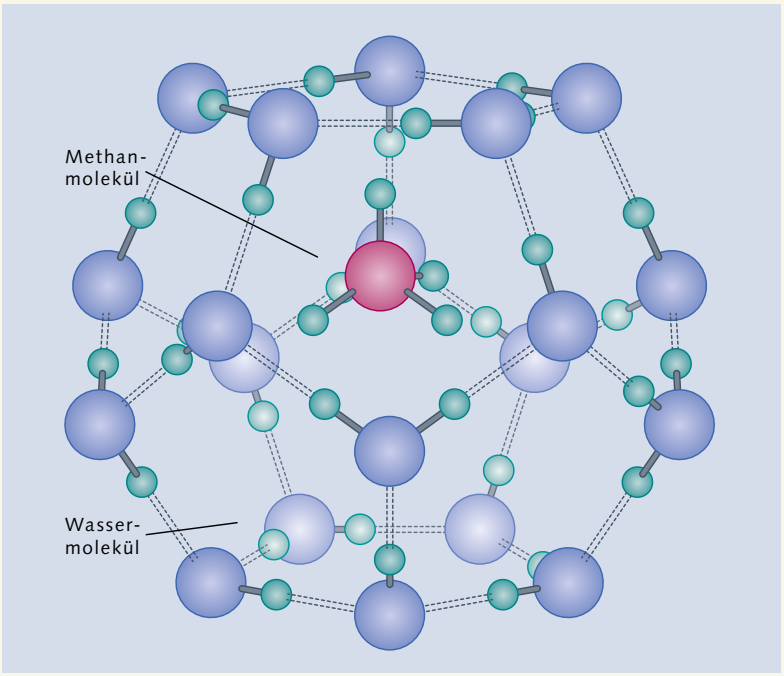
Methanhydrate entstehen natürlich nur dort, wo ausreichend Methan zur Verfügung steht. Dieses bildet sich im Meeresboden auf 2 unterschiedliche Arten:

- Biogenes Methan entsteht im Meeresboden durch den mikrobiellen Abbau von Biomasse. Bei dieser Biomasse handelt es sich um abgestorbene Planktonorganismen wie zum Beispiel Mikroalgen oder Kleinkrebse, die in der Wassersäule zum Meeresboden sinken und sich im Laufe der Zeit zu mächtigen Sedimentpaketen anhäufen. Die Methan erzeugenden Mikroorganismen zersetzen die Biomasse in Methan und Kohlendioxid. Dieser Prozess wird Methanogenese genannt. Experten schätzen, dass 80 bis 90 Prozent des weltweit in Hydraten lagernden Methans biogen durch

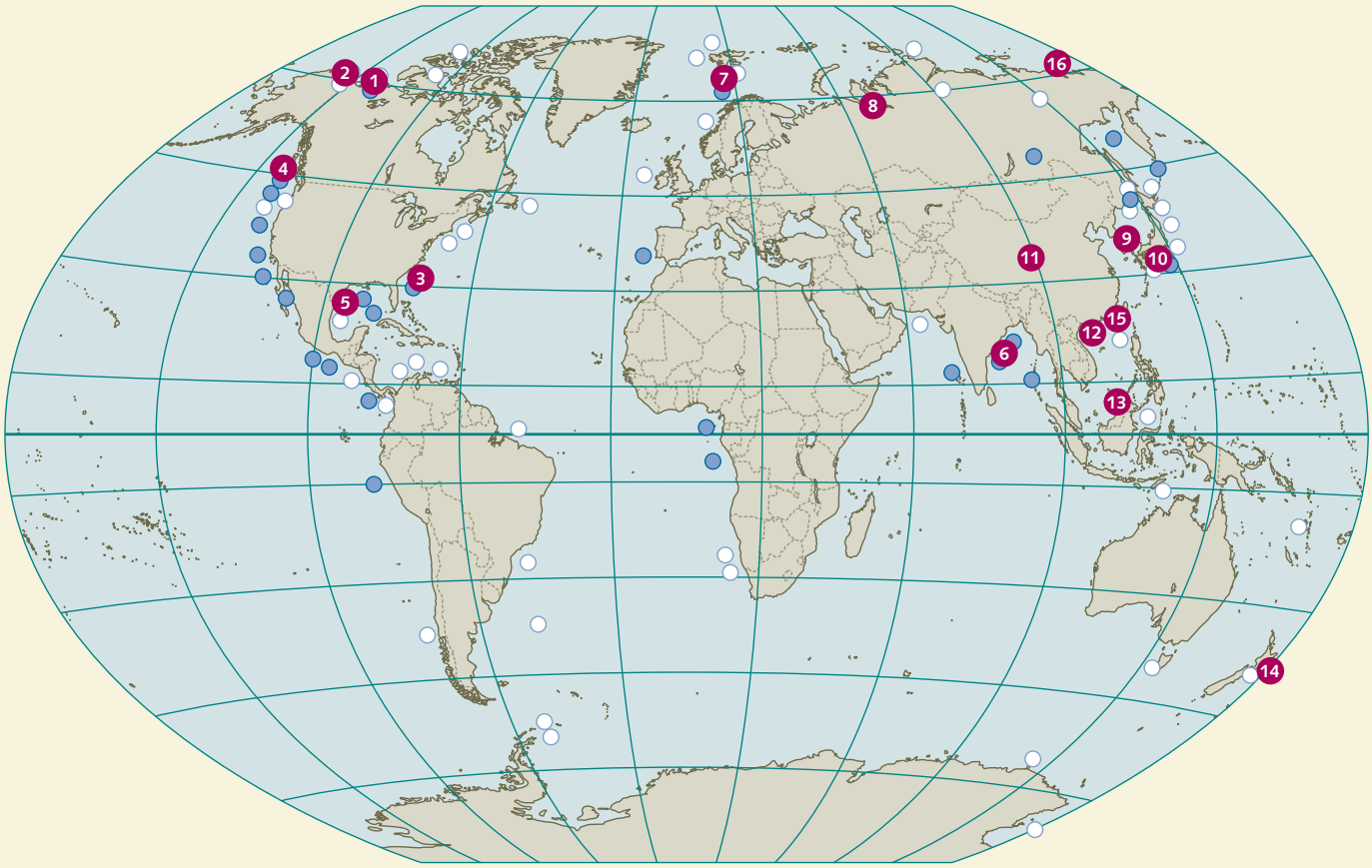
Brennbares Eis aus Methan und Wasser

Methanhydrat bildet sich bei Temperaturen von unter 10 Grad Celsius und hohen Drücken von mehr als 30 bar, dem 30-Fachen des Atmosphärendrucks, aus Wasser und Methangas. Das Methan wird dabei von Wassermolekülen umschlossen und in eine Art Molekülkäfig gesperrt. Chemiker nennen derartige Molekülstrukturen daher Clathrate (lat. *clatratus:* vergittert). Methanhydrate entstehen im Permafrostboden an Land oder im Meeresboden. In der Regel sind sie von einer Sedimentschicht bedeckt. Voraussetzung für die Bildung im Meeresboden ist, dass ausreichend hohe Drücke und niedrige Temperaturen herrschen. Je wärmer das Wasser ist, desto höher muss der Wasserdruck sein. In der Arktis findet man daher Methanhydrat im Meeresboden bereits ab rund 300 Meter Wassertiefe, in den Tropen erst unterhalb von 600 Metern. Weltweit liegen die meisten Methanhydratvorkommen zwischen 500 und 3000 Meter Wassertiefe. Die Hydrate sind fest und weiß und ähneln damit gewöhnlichem Wassereis. Holt man sie vom Meeresboden herauf, zerfallen sie langsam. Dabei wird das Methangas frei, das sich entzünden lässt.

Methan- und Wassermoleküle reagieren für gewöhnlich nicht miteinander. Bei Raumtemperatur bewegen sie sich viel zu schnell, als dass sich zwischen ihnen chemische Bindungen bilden könnten. Bei Kälte aber verlangsamt sich die Molekularbewegung. Durch hohen Druck nähern sich die Methan- und Wassermoleküle schließlich so stark an, dass die Clathratstruktur entsteht. Erhöht sich die Temperatur oder sinkt der Druck, reißen die schwachen Bindungen wieder. Das Clathrat zerfällt und das Methan wird frei.



3.1 > Im Methanhydrat ist das Methanmolekül von mehreren Wassermolekülen (H_2O) umschlossen. Die Sauerstoffatome des Wassers sind blau und die Wasserstoffatome grün dargestellt. Schwache elektrostatische Kräfte zwischen den Atomen, die Wasserstoffbrückenbindungen, halten das Methanhydrat zusammen. Das Methanmolekül im Zentrum des Clathrats besteht aus 1 Kohlenstoffatom C (rosa) und 4 Wasserstoffatomen H (grün), die wie die Ecken einer Pyramide angeordnet sind. Das chemische Symbol für Methan ist entsprechend CH_4. Unter Atmosphärendruck zerfällt das Methanhydrat langsam und gibt das Methan frei, welches sich entzünden lässt.



Bedeutende Gashydratvorkommen

3.2 > Methanhydratvorkommen gibt es in allen Ozeanen und auch an Land. Mit Weiß sind Vorkommen gekennzeichnet, die mithilfe geophysikalischer Methoden identifiziert wurden. Die blauen Punkte zeigen Vorkommen, die durch direkte Beprobung nachgewiesen wurden. Die weltweit wichtigsten Forschungsstandorte und -gebiete sind zusätzlich mit Zahlen aufgeführt.

1

MALLIK: 1972 wurden im Sand des Mallik-Gebiets auf Richards Island in Kanadas Nordwest-Territorien hohe Gashydratkonzentrationen nachgewiesen. In der Folge wurden hier in den Jahren 1998, 2002 und 2007/08 drei richtungsweisende Evaluierungsprogramme für Gashydrate mit entsprechenden Probebohrungen durchgeführt. Diese Programme haben gezeigt, dass Gashydrate über Bohrungen abgebaut werden können und dass das Druckentlastungsverfahren offenbar die vorteilhafteste Fördermethode ist.

2

NORTH SLOPE: 1972 wurden in Alaska, in der Region North Slope, am Bohrloch Northwest Eileen State 2 Gashydrate entdeckt und näher erforscht. Das Ziel der Probebohrungen war es ursprünglich, die Erdölvorkommen zu untersuchen, doch machten die Bohrungen auch erste Schätzungen der Gashydratmengen möglich. So wurde die Größe der Hydratlagerstätte auf rund 16 Billionen Kubikmeter geschätzt. Lange Zeit wurden die Hydratvorkommen nicht näher beachtet, bis 2007 ganz in der Nähe die Mount-Elbert-Probebohrung durchgeführt wurde. Im Jahr 2008 schätzte der United States Geological Survey (USGS), das wichtigste Institut für amtliche Kartografie in den USA, die mit der derzeitigen Fördertechnik förderbare Gasmenge in der Region auf 2,4 Billionen Kubikmeter. Um die Förderung von Gashydraten zu testen, wurde 2011 in der Prudhoe Bay ein Bohrloch angelegt.

3

BLAKE RIDGE: Dieses Areal am Kontinentalhang vor der Küste des US-Bundesstaats North Carolina war eines der ersten Gebiete, in denen Gashydratvorkommen im Meer erforscht wurden. Die Hydratvorkommen wurden bei der geologischen Untersuchung des Meeresbodens mit Druckwellen entdeckt. Die Methanhydratlager im Meeresboden verrieten sich durch ein auffälliges Reflexionsmuster in den Bodenanalysebildern des Bottom Simulating Reflector (BSR, den Meeresboden simulierender Reflektor). Forschungsbohrungen bestätigten 1995 die Existenz einer ausgedehnten Lagerstätte. Die Gasmenge wurde auf rund 28,3 Billionen Kubikmeter geschätzt. Allerdings liegt das Gas im Boden in geringer Konzentration vor.

4

KASKADIEN-KONTINENTALRAND: Dieses Gebiet vor der Pazifikküste der USA wurde im Rahmen des Ocean Drilling Program (ODP) beprobt. Dieses internationale Programm hat das Ziel, durch eine Vielzahl von Bohrungen neue Erkenntnisse über den Aufbau der Erde und die Erdgeschichte zu gewinnen. Auf zwei Fahrten, 2002 und 2005, wurde in diesem Gebiet der Hydratrücken vor Oregon näher untersucht.

5

GOLF VON MEXIKO: In diesem Gebiet wurden 1995 auf dem Meeresboden mächtige Gashydrathügel entdeckt. Diese Strukturen sind vor allem deshalb interessant, weil sich hier spezielle Lebensgemeinschaften entwickelt haben. Bei Bohrungen im Alaminos Canyon Block 818 fand man später Gashydrate in marinen Sanden. Derartige Vorkommen sind bedeutend, da sich Hydrate in Sanden relativ leicht abbauen lassen. 2005 untersuchten Forscher und Industrieunternehmen hier gemeinsam Sicherheitsaspekte der Tiefseebohrungen. Im Jahr 2009 wurden bei einer weiteren Bohrkampagne in den Sanden hochkonzentrierte Gashydratvorkommen entdeckt.

6

INDISCHER OZEAN: Im Rahmen einer 113 Tage langen Expedition wurden Gashydratvorkommen an einer Fundstelle im Arabischen Meer, an zwei Fundstellen im Golf von Bengalen und einer Fundstelle in der Andamanen-Inselgruppe untersucht. Im Krishna-Godavari-Becken vor der indischen Südostküste stießen die Forscher im sogenannten Block 10 auf Gashydratvorkommen in einer etwa 130 Meter dicken Schicht. Diese wiesen hohe Gashydratkonzentrationen auf.

7

SPITZBERGEN: Der Schelf vor der Küste Westspitzbergens wurde schon mehrfach untersucht. Anfang dieses Jahrhunderts entdeckte man dort mehrere Stellen, an denen Methangas austritt. Dieses stammt vermutlich aus dem Grenzbereich der Gashydratstabilitätszone (GHSZ). Wissenschaftler gehen davon aus, dass sich die Hydrate hier aufgrund klimatischer Veränderungen auflösen.

8

MESSOYAKHA: Dieses Öl- und Gasfeld im westlichen Sibirien lieferte die ersten handfesten Beweise für die Existenz von Gashydrat in der Natur. In diesem Gebiet wird Erdgas gewonnen, das zu einem Teil aus den Gashydratvorkommen stammt. Darauf weisen Bohrdaten und diverse Messungen hin.

9

ULLEUNG-BECKEN: In den Jahren 2007 und 2010 wurden im Ulleung-Becken vor Südkorea Tiefseebohrungen durchgeführt. Die Wissenschaftler förderten zudem Bohrkerne an die Meeresoberfläche. Während der Expedition wurde eine Vielzahl vertikaler, schornsteinähnlicher Strukturen entdeckt, die hohe Konzentrationen an Gashydraten aufwiesen. Die Hydrate liegen hier offenbar in Poren in Sanden und in sogenannten deformierten Schlämmen vor.

10

NANKAI-TROG: In diesem Gebiet vor Japan wurde 1999 erstmals in marinen Sanden Gashydrat in Rohstoffqualität entdeckt. Weitere geophysikalische Untersuchungen und ein zweites Bohrprogramm im Jahr 2004 haben gezeigt, dass im Nankai-Trog eine Gasmenge von 1,1 Billionen Kubikmetern lagert. Davon liegen rund 566 Milliarden Kubikmeter in hochkonzentrierter Form in Sanden vor. 2013 wurde hier zum ersten Mal Methan aus einer Probebohrung im Meer gewonnen. Nach der Bohrung im Nankai-Trog 1999 gilt die Industriebohrung im Alaminos Canyon Block 818 im Golf von Mexiko im Jahr 2003 als zweite Fundstelle von Gashydrat in marinen Sanden.

11

QILIAN-HOCHGEBIRGE: Dieses Hochgebirge befindet sich im Hochland von Tibet im Westen Chinas und weist bis zu 100 Meter tiefe Permafrostböden auf. Hier wurden in den Jahren 2008 und 2009 Bohrkampagnen durchgeführt, mit denen Gashydratvorkommen in sogenannten klüftigen Sand- und Tonsteinen nachgewiesen wurden. Diese Gesteine entstanden in der erdgeschichtlichen Epoche des Juras vor rund 200 Millionen Jahren.

12

SHENHU-BECKEN: Diese Region des Südchinesischen Meeres wurde Anfang 2007 im Rahmen einer meeresgeologischen Kartierung der Guangzhou Marine Geological Survey (GMGS), eines staatlichen chinesischen Instituts für Meeresgeologie, erforscht. Die bei der Expedition entdeckten Gashydratkonzentrationen in feinkörnigen Bodenschichten erwiesen sich als höher als zunächst vermutet und sind wahrscheinlich auf erhöhte Konzentrationen an feinen Bodenanteilen (Schluff) und auf Ablagerungen von Planktonorganismen mit Kalkpanzer, den Großforaminiferen, zurückzuführen.

13

GUMUSUT-KAKAP: In diesem Ölfeld vor der Ostküste Malaysias wurden 2005 erstmals von der Industrie mögliche Gefahren untersucht, die von der Förderung tief gelegener Öl- und Erdgasvorkommen ausgehen könnten. Dazu zählen mögliche Hangrutschungen oder Tsunamis. Besonders untersucht wurden in diesem Projekt Öl- und Erdgasvorkommen, die unter Gashydrat führenden Schichten lagern.

14

NEUSEELAND: In den frühen 1980er Jahren wurden in diesem Gebiet am Rand des Hikurangi-Trogs vor der Ostküste Neuseelands bei Untersuchungen des Meeresbodens starke BSR-Reflexionssignale aufgenommen. Seitdem wird diese Region weiter mit einer Vielzahl von Messverfahren intensiv untersucht. Weitere Expeditionen zu verschiedenen Gebieten in der Ausschließlichen Wirtschaftszone Neuseelands deuten darauf hin, dass es dort noch in vielen anderen Bereichen Gashydratlagerstätten geben könnte.

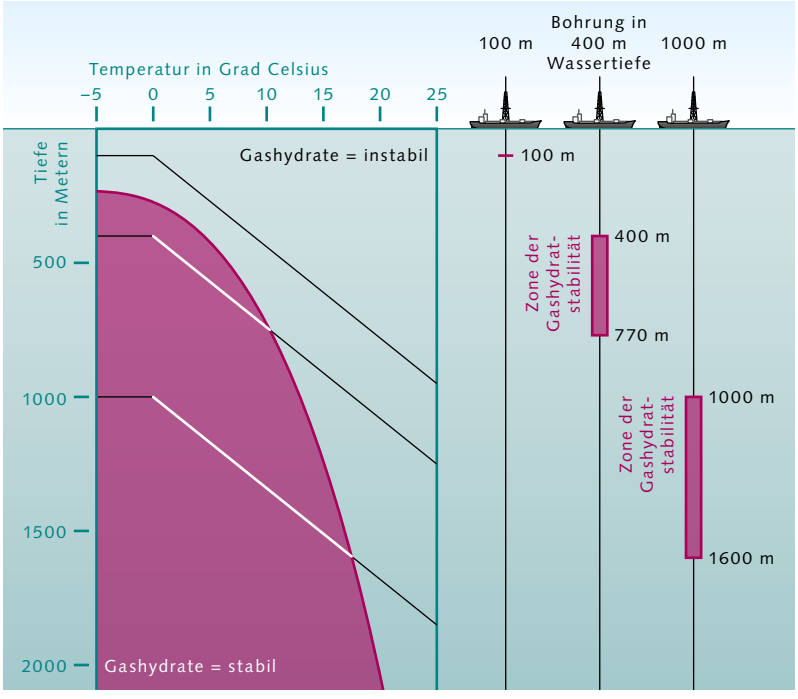
15

TAIWAN: Taiwan liegt in einem Gebiet, in dem Kontinentalplatten aufeinandertreffen. In diesem Bereich wird unter anderem methanhaltiges Wasser aus dem Sediment gepresst, sodass Methan für die Bildung von Hydraten zur Verfügung steht. Die Kollisionszone der Kontinentalplatten wird seit 2004 mit Bohrungen intensiv untersucht. Während der Bohrkampagnen wurden deutliche Hinweise auf Gashydratvorkommen gefunden. Die Hydrate erstrecken sich vermutlich über Meeresgebiete mit einer Gesamtfläche von rund 11 000 Quadratkilometern, was der Größe des westafrikanischen Staates Gambia entspricht.

16

OSTSIBIRISCHER SCHELF: Der ostsibirische Schelf ist ein ehemaliger Küstenbereich mit Permafrostboden, der nach der letzten Eiszeit aufgrund des steigenden Meeresspiegels überspült wurde. Bei wissenschaftlichen Untersuchungen wurden im Meerwasser und in den oberen Meeresbodenschichten hohe Methankonzentrationen nachgewiesen. Woher das Methan stammt, ist noch unklar. Möglicherweise stammt es aus Methanhydraten, die in den Permafrostresten des untergegangenen Küstengebiets lagern.

Methanogenese erzeugt wurde. Die methanogenen Bakterien sind in einer Sedimenttiefe von etwa 10 Metern bis 3 Kilometern zu finden. Oberhalb von 10 Metern sind andere Mikroorganismen aktiv, die kein Methan erzeugen. Direkt auf dem Meeresboden und in den oberen Zentimetern des Sediments leben Mikroorganismen, die Sauerstoff benötigen. Diese sogenannten aeroben, sauerstoffzehrenden, Mikroorganismen zersetzen bereits einen großen Teil der herabsinkenden Biomasse. In den nahezu sauerstofffreien Sedimentschichten darunter sind wiederum Mikroorganismen aktiv, die für ihren Stoffwechsel statt des Sauerstoffs die Schwefelverbindung Sulfat benötigen, die in diesen Sedimentschichten in großen Mengen vorhanden ist. Auch diese sogenannten Sulfatreduzierer verbrauchen Biomasse, ohne Methan zu erzeugen. Erst im sauerstoff- und sulfatfreien Milieu unterhalb von 10 Metern können die methanogenen Mikroorganismen gedeihen.



3.3 > Gashydrate kommen dort vor, wo viel Biomasse zu Boden sinkt und zugleich niedrige Temperaturen und hohe Drücke herrschen – insbesondere an den Kontinentalabhängen. Je höher die Wassertemperatur ist, desto größere Tiefen und Drücke sind für die Bildung des Hydrats nötig. In sehr großer Tiefe jedoch ist die Temperatur im Meeresboden aufgrund der Erdwärme so hoch, dass sich dort keine Methanhydrate mehr bilden können.

- Thermogenes Methan entsteht in sehr viel tieferen Schichten der Erdkruste ohne die Aktivität von Mikroorganismen auf chemischem Wege. Die Entstehung gleicht der von Erdöl und Erdgas. Durch hohe Drücke und bei Temperaturen von mehr als 100 Grad Celsius werden die Überreste Jahrmillionen alter Biomasse in harten Sedimentgesteinen, die mehrere Kilometer tief liegen, in Methan umgewandelt. Dabei handelt es sich um rein chemische Prozesse, die durch Wärme getrieben sind. Durch Risse im Untergrund kann das thermogene Methan dann bis in Schichten aufsteigen, wo Druck- und Temperaturverhältnisse die Bildung von Hydraten erlauben.

Voraussetzung für die Bildung von Methanhydraten sind also die richtige Temperatur, der richtige Druck und eine ausreichende Methankonzentration. Diese Bedingungen findet man vor allem in den Gebieten nahe der Küsten, insbesondere an den Kontinentalabhängen unterhalb von 500 Meter Wassertiefe. Die meisten Küstengebiete sind reich an Nährstoffen, die durch die Flüsse ins Meer transportiert werden. Hier gedeihen Unmengen von Planktonorganismen, die wiederum Nahrung für höhere Tiere sind. Die Küstengebiete sind folglich enorm produktiv, und entsprechend groß ist die Menge abgestorbener Biomasse, die zum Meeresboden rieselt und sich als Sediment ablagert.

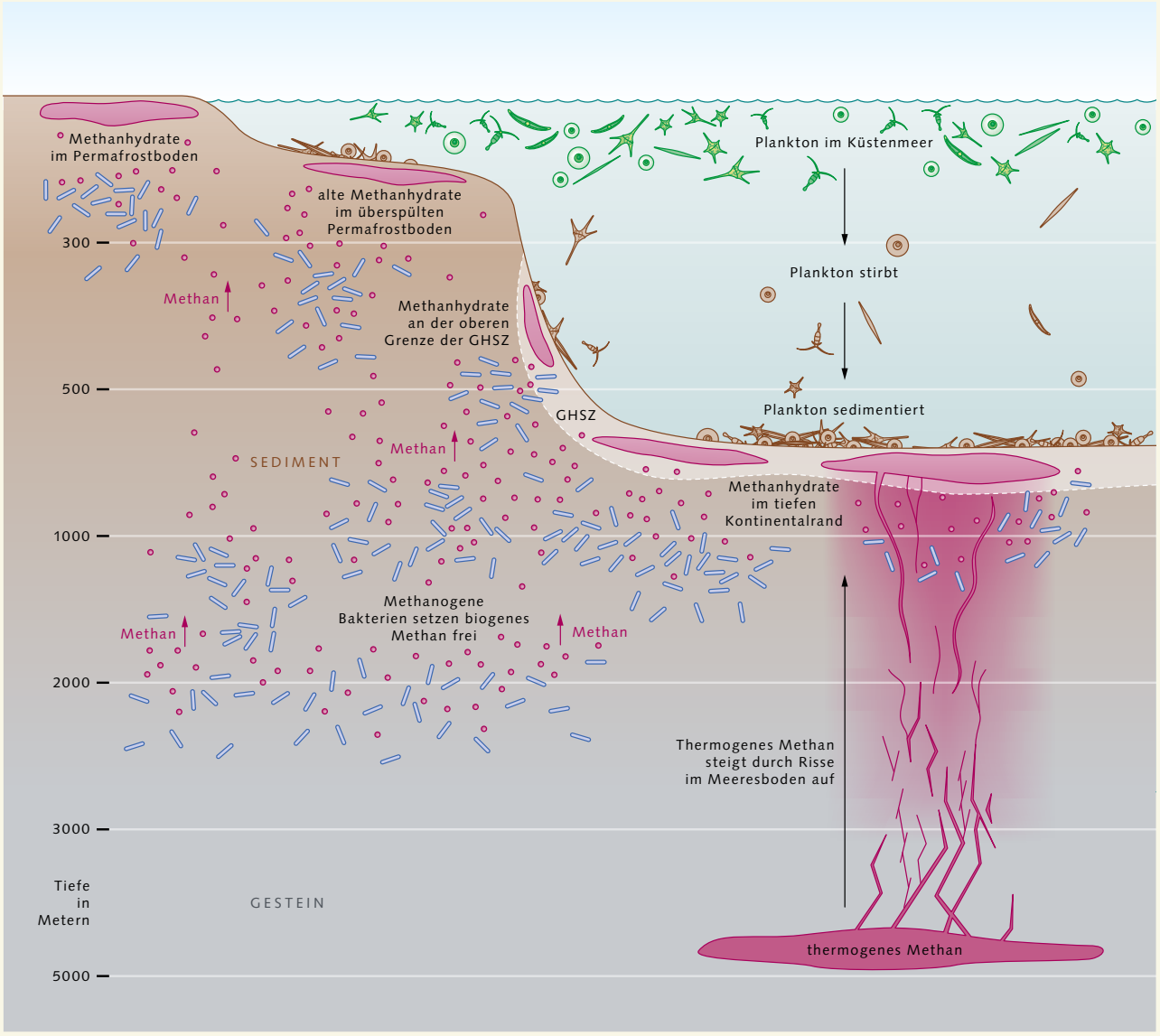
Die Meeresregionen fernab der Küsten sind hingegen relativ nährstoffarm. Entsprechend gering ist dort die Produktion von Biomasse und die Menge an Plankton, die zu Boden sinkt. Methanhydrate kommen daher in der küstenfernen Tiefsee so gut wie nicht vor.

Die Zone, in der Gashydrate im Meeresboden stabil sind, nennt man Gashydratstabilitätszone (GHSZ). Das ist jener Bereich, in dem die für die Methanhydratbildung erforderlichen Temperaturen und Drücke herrschen. Oberhalb der GHSZ ist der Umgebungsdruck zu gering, als dass Methan und Wasser miteinander reagieren könnten. Unterhalb der GHSZ ist es durch die Nähe zum heißen Erdinneren zu warm. So steigt die Temperatur im Boden mit jedem Kilometer Richtung Erdkern um 30 bis 40 Grad Celsius an. Die Dicke und die Lage der GHSZ unterscheiden sich von Meeresgebiet zu Meeresgebiet. In manchen Fällen ist die GHSZ nur wenige Meter dick und liegt direkt

Die Entstehung der Methanhydrate

Methanhydrat bildet sich in der Gashydratstabilitätszone (GHSZ). Hier herrschen die richtigen Drücke und Temperaturen, bei denen Methan- und Wassermoleküle Clathrate bilden. Das Methan steigt aus der Tiefe bis zur GHSZ auf: In den tiefen, oberen Sedimentschichten wird biogenes, von Mikroorganismen erzeugtes, Methan frei. In den noch tiefer liegenden Sedimentschichten entsteht das Methan durch chemische Umwandlung von Biomasse bei hohen Drücken und Temperaturen (thermogenes Methan). Durch Risse im Boden kann es bis zur GHSZ aufsteigen. Methanhydrate kommen in verschiedenen Gebieten vor: im arktischen Permafrostboden, in alten Permafrostböden, die nach der Eiszeit überspült wurden, sowie am oberen und unteren Kontinentalrand.

3.4



unter dem Meeresboden. In anderen Fällen kann sie bis zu 800 Meter dick sein und mächtige Sedimentablagerungen umfassen.

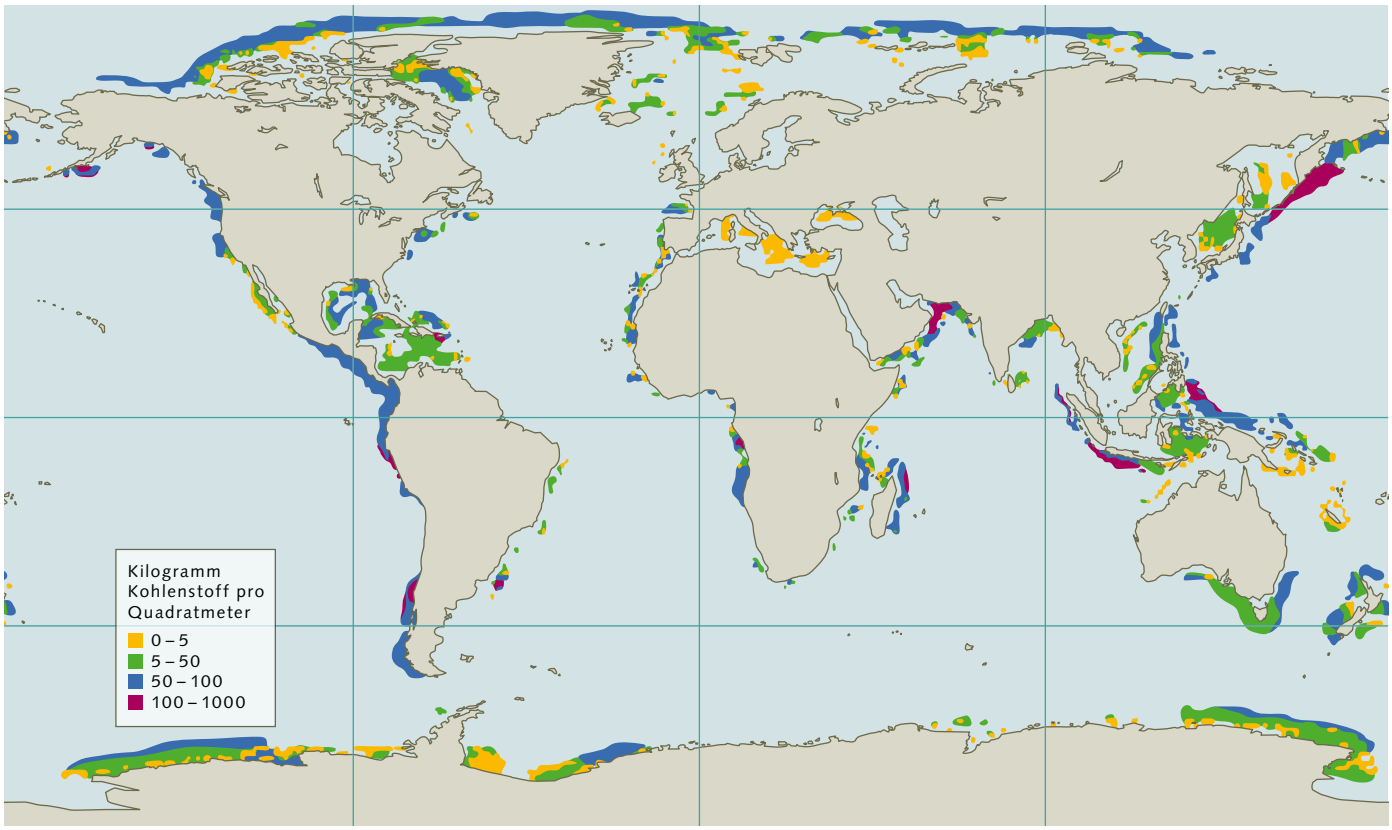
Die Methanhydratmengen abschätzen

Bislang wurden erst wenige Methanhydratvorkommen im Meer im Detail untersucht. Dennoch hat man versucht, die weltweit verfügbare Menge an Methanhydraten zu berechnen, und kam dabei zu Schätzungen von 500 bis 55 000 Gigatonnen Kohlenstoff. 1 Gigatonne entspricht 1 Milliarde Tonnen. Kohlenstoff macht 75 Prozent der Masse des Methanmoleküls aus und wird daher als Bezugsgröße verwendet. Auf diese Art lassen sich die Vorkommen auch mit anderen fossilen Rohstoffvorkommen vergleichen. Dass die Angaben derart voneinander abwichen, lag vor allem daran, dass die Forscher verschiedene Einflussgrößen in ihren Berechnungen berücksichtigen mussten und diese unterschiedlich gewichtet wurden. Für eine genaue Abschätzung der weltweiten Methanhydratvorräte müssen die Wissenschaftler zum einen möglichst genau berechnen, wie viel Biomasse im Laufe der Jahrmillionen in den Meeren sedimentiert ist und für die Methanogenese zur Verfügung stand. Zum anderen müssen sie abschätzen, wie viel Methan letztlich in die GHSZ vordringen konnte. Dabei sind unter anderem folgende Aspekte zu berücksichtigen:

3.5 > Steinerne Schönheit: Strömungen und Wellen haben auf der Point-Loma-Halbinsel in Kalifornien Turbidite freigespült.

- klimatische Veränderungen, die die Produktion von Plankton und Biomasse in den verschiedenen erdgeschichtlichen Epochen beeinflusst haben;
- die Aktivität der aeroben Mikroorganismen und der Sulfatreduzierer, die in den oberen Sedimentschichten bereits große Mengen der Biomasse verbrauchen;
- die Veränderung der Küstenlinien durch das Steigen und Fallen des Meeresspiegels während der Warm- und Eiszeiten. Da Meeresgebiete trockenfielen, fand zu bestimmten Zeiten keine Sedimentation statt. In anderen Perioden nahm die Sedimentation zu oder ab;
- die Methankonzentration im sogenannten Porenwasser. Methangas wandert in den mit Wasser gefüllten Ritzen, den Poren, zwischen den Sedimentpartikeln aufwärts. Je nachdem, wie viel Methan aus der Tiefe aufsteigt, ist die Methankonzentration im Porenwasser kleiner oder größer. Unabhängig von den vorherrschenden Drücken oder Temperaturen kann sich Methanhydrat erst dann bilden, wenn das Porenwasser eine ausreichend hohe Methankonzentration erreicht;
- die Plattentektonik: Von Interesse sind Regionen, in denen eine Kontinentalplatte unter eine andere abtaucht, die sogenannten Subduktionszonen. Während die Platte abtaucht, wird das Porenwasser aus dem Sediment wie aus einem Schwamm gequetscht. Es steigt auf und trägt darin enthaltenes Methan mit sich. Diese Prozesse finden auch heute noch statt. Gelangt das Methan in die GHSZ, kann es wesentlich zur Produktion von Methanhydrat beitragen. Die Herausforderung besteht darin, den Aufstieg von Wasser und Methan in den Subduktionszonen genau zu berechnen.

Aktuelle Schätzungen, die versuchen all diese Aspekte zu berücksichtigen, kommen auf eine weltweite Gashydratmenge in einer Größenordnung zwischen 500 und 1500 Gigatonnen Kohlenstoff. Das ist deutlich weniger als die noch vor wenigen Jahren postulierten 55 000 Gigatonnen, aber deutlich mehr als die Reserven an konventionellem Erdgas, die heute auf etwa 100 Gigatonnen Kohlenstoff geschätzt werden. Neben einer Gesamteinschätzung ist für die Forscher auch die detaillierte Berechnung der Methanhydratvorräte in bestimmten Meeresregionen in-



teressant. Denn diese geben Hinweise darauf, wo es sich lohnt, die Methanhydratlagerstätten mit Forschungsschiffen genauer zu untersuchen. Schiffsexpeditionen sind ausgesprochen teuer. Insofern haben Energiekonzerne und Wissenschaftler ein Interesse daran, in erster Linie große Lagerstätten zu erkunden, die künftig viel Methan liefern könnten.

Vielversprechende Baumkuchensedimente

Ob und wie viel Methan künftig aus den GHSZ gefördert werden kann, hängt vor allem auch von den Sedimenten ab, in denen sich das Methanhydrat befindet. Es gibt verschiedene hydrathaltige Sedimenttypen, die sich durch den Anteil größerer oder kleiner Partikel unterscheiden: Sand und Sandstein, Ton sowie Mischformen.

Sand und Sandstein haben relativ große Poren, aus denen sich das Methan leicht herauslösen lässt. Weltweit gibt es aber nur wenige solcher großen Sandkörper, die überhaupt Methanhydrate enthalten. Aus kompakten Tonsedimenten, in denen die Partikel sehr verdichtet sind, lässt sich Methanhydrat hingegen überhaupt nicht fördern.

Weitverbreitet sind sogenannte Turbidite. Dabei handelt es sich um eine Mischform aus Sand- und Tonsedimenten. In den baumkuchenartigen Turbiditsedimenten wechseln sich Sand- und Tonlagen ab. Turbidite sind im Laufe der Zeit vor allem durch Hangrutschungen an Kontinentalabhängen entstanden. Wenn sich zu viel Sediment abgelagert hat, kommt der Hang ins Rutschen. Am Fuß des Hangs schieben sich dann die Sedimente schichtweise übereinander.

Zum Teil sind die einzelnen Turbiditschichten nur wenige Zentimeter mächtig. Gelegentlich können die einzelnen Lagen aber auch eine Mächtigkeit von 10 Metern erreichen. Wie gut sich Methan aus Hydraten in Turbiditen fördern lässt, wurde in den vergangenen Monaten mit Probebohrungen vor Japan untersucht.

3.6 > Methanhydrate kommen weltweit vor allem an den Kontinentalabhängen vor. Nach aktuellen Schätzungen befinden sich die größten Lagerstätten vor Peru und der Arabischen Halbinsel. Die Grafik berücksichtigt nur die biogen entstandenen Gashydrate. Nicht berücksichtigt ist der Beitrag der Methanmengen, die thermogen entstanden sind.

Methanhydrat – eine neue Energiequelle?

> Vor allem für Staaten, die heute den Großteil ihres Energieverbrauchs durch den Import von Gas, Kohle und Öl decken, sind Methanhydrate in den eigenen Hoheitsgewässern eine vielversprechende Energiequelle. Noch aber gibt es keine Technik, mit der sich die Hydrate industriell fördern lassen. Nach erfolgreichen Probebohrungen an Land treibt man jetzt insbesondere in Südostasien erste Forschungsprojekte im Meer voran.

Ein Ausweg aus der Abhängigkeit?

Wirtschaftlich betrachtet, sind die weltweiten Methanhydratvorräte allein schon wegen ihrer Größe interessant. Besonders attraktiv sind Methanhydrate für jene Staaten, die kaum über eigene fossile Rohstoffe verfügen und diese für viel Geld importieren müssen. So deckt beispielsweise Japan seinen Energiebedarf zum großen Teil durch Öl-, Kohle- und Gasimporte. Dieses Land war bereits vor dem Unfall im Atomkraftwerk Fukushima ein großer Energieimporteur. Mit dem Abschalten der japanischen Atomkraftwerke nach dem Unglück hat sich die Abhängigkeit von den Importen aber noch verstärkt. Alle Energierohstoffe werden per Schiff nach Japan transportiert, das Erdgas in Form von Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas, LNG). Da die Verflüssigung und der Transport teuer sind, sind die Gaspreise in Japan besonders hoch. Dort kostet Erdgas rund 4-mal so viel wie in den USA. Vergleichbar ist die Situation in Südkorea, das mehr als 90 Prozent der benötigten fossilen Energieträger importiert, neben Erdgas insbesondere Kohle für die Stromerzeugung. Große Stromverbraucher sind dort die Stahlerzeugung sowie die Chip- und Elektronikindustrie. Auch für andere Regionen in Südostasien wie zum Beispiel Taiwan oder Vietnam wären Methanhydrate ein Ausweg aus der Abhängigkeit von Energieimporten.

Importländer	bcm
Japan	116
Italien	70
Deutschland	68
USA	55
Korea	47
Türkei	43
Frankreich	41
Großbritanien	37
Spanien	34
Sonstige	279
Total	834

3.7 > Japan und Südkorea gehören 2011 zu den 10 größten Nettogasimporteuren weltweit, also jenen Nationen, die deutlich mehr Erdgas importieren müssen, als sie selbst produzieren und exportieren können. Japan und Korea führen den Rohstoff per Schiff ein. Gashydrate in den eigenen Hoheitsgewässern wären eine Alternative. Die Abkürzung bcm steht für 1 Milliarde Kubikmeter.

Erste Schritte zum Abbau der Methanhydrate

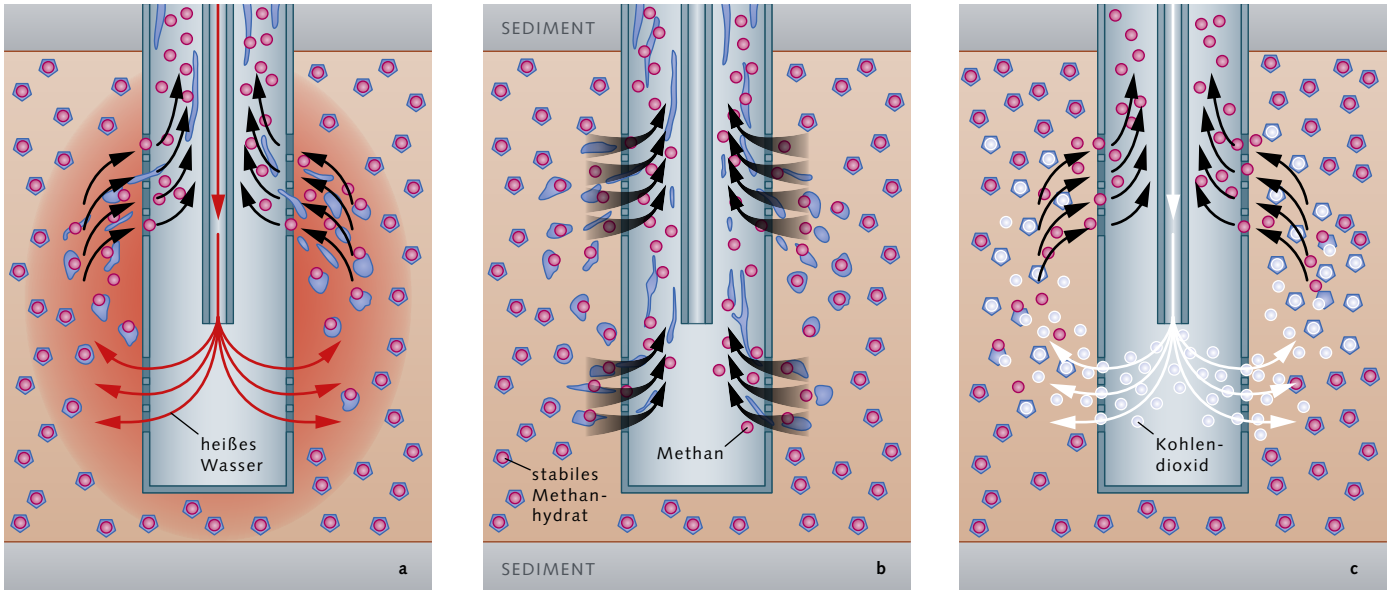
Ob und wie sich Methanhydrate künftig fördern lassen, wird seit gut 10 Jahren in internationalen Projekten untersucht. Die Wissenschaftler wollen zunächst herausfinden, ob sich das Methan überhaupt in großen Mengen aus den Hydraten lösen lässt und welche Methode dafür am besten geeignet ist. Der Abbau von Methanhydrat unterscheidet sich fundamental von der Erdgas- und Erdölgewinnung. Erdgas und Erdöl strömen von selbst durch die Poren der Lagerstätten zur Bohrung hin. Die Hydrate hingegen sind fest und müssten zunächst zersetzt werden, bevor man das Methangas überhaupt absaugen kann. Für die zukünftige Gewinnung von Methan lassen sich die folgenden drei Verfahren unterscheiden:

SPÜLUNG MIT WASSER: Über eine Bohrung wird heißes Wasser in die Methanhydratlagerstätte eingepumpt und die Temperatur damit so stark erhöht, dass sich das Hydrat zersetzt und das Methan frei wird.

DRUCKENTLASTUNG: In den Methanhydratlagern herrschen hohe Drücke, weil auf ihnen Wasser und Sedimente lasten. Bohrt man die Lagerstätten von oben an, verringert sich der Druck wie in einem Fahrradschlauch bei einem Loch. Durch diese Druckentlastung zerfällt das Hydrat langsam. Das Methan wird frei.

INJEKTION VON KOHLENDIOXID: Methan lässt sich aus Hydraten lösen, wenn man diese mit Kohlendioxid begast. Das Kohlendioxid verdrängt das Methan aus dem Clathrat und schlüpft selbst in den Molekülkäfig. Dabei geht das Kohlendioxid eine festere Bindung mit den Wassermolekülen ein als das Methan. Das Kohlendioxidhydrat ist also wesentlich stabiler als das Methanhydrat. Nach den Plänen der Forscher soll für die Injektion in Zukunft Kohlendioxid genutzt werden, das man in Gas- und Kohlekraftwerken aus dem Abgas abtrennt. So gelangt das Kohlendioxid nicht in die Atmosphäre, sondern wird in flüssiger Form per Schiff oder Pipeline zur Lagerstätte transportiert und dann in den Hydraten gespeichert.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Projekte durchgeführt, mit denen Forscher und Industrieunternehmen zunächst untersuchten, ob sich Methanhydrat mit diesen



3.8 > Methanhydrat lässt sich auflösen, indem man heißes Wasser einpresst (a) oder mithilfe von Pumpen den Druck im Bohrloch verringert (b). Pumpt man Kohlendioxid ins Hydrat (c), verdrängen die Kohlendioxidmoleküle das Methan. In diesem Fall zerfällt das Hydrat nicht.

Methoden tatsächlich in industriellem Maßstab fördern lässt. Erste Produktionstests wurden vor etwa 10 Jahren im Permafrostboden des Mackenzie-Flussdeltas in Nordwestkanada von Partnern aus Japan, Kanada und Deutschland durchgeführt. Sie gelten als Meilensteine, weil hier wichtige Erkenntnisse für die künftige Methanhydratförderung gewonnen wurden. So zeigte sich beispielsweise, dass das Druckentlastungsverfahren einfacher und auch billiger als die Spülung mit Heißwasser ist. Darüber hinaus wurden Filter entwickelt und getestet, die die Sedimente zurückhalten, die in der Tiefe wegen des hohen Drucks ins Bohrloch drängen. Zwar sind Sandfilter in der Gas- und Ölindustrie längst etabliert, für die Förderung von Methanhydraten aber gab es bis dato noch keine Patentlösung.

In den Jahren 2011 und 2012 führte ein japanisch-US-amerikanisches Industriekonsortium mit Unterstützung durch das US-Energieministerium (United States Department of Energy, DOE) im Permafrostboden von Nordalaska das Ignik-Sikumi-Projekt durch. Hier wurde erstmals außerhalb des Labors unter natürlichen Bedingungen der Austausch von Kohlendioxid und Methan erprobt. Schon nach wenigen Tagen war das eingebrachte Kohlendioxid im Hydrat fixiert. Für mehrere Wochen konnte dann fast reines Methangas gefördert werden. Die Gasausbeute war dabei größer, als mathematische Modelle dies vorhergesagt hatten.

Anfang 2013 schließlich wurde erstmals ein Feldversuch im Meer durchgeführt. In einem Meeresbecken 80 Kilometer vor der japanischen Küste, im Nankai-Trog, förderten japanische Forscher über eine Bohrung eine Woche lang Methan aus einer Wassertiefe von 1000 Metern an die Oberfläche. Das Gashydrat wurde dabei durch Druckentlastung zersetzt. Japan hat sich jetzt das Ziel gesetzt, 2018 eine erste große Pilotförderanlage in Betrieb zu nehmen. Die für den Dauerbetrieb erforderliche Technik muss aber noch entwickelt werden.

Aller Anfang ist schwer

Ganz gleich, welches Verfahren man künftig für die Methangewinnung wählt, für alle gilt, dass die Förderrate entscheidend davon abhängt, wie schnell sich das Hydrat im Untergrund zersetzt. Experimente im Labor und die Probebohrungen im Freiland zeigen, dass alle Verfahren heute noch schnell an ihre Grenzen stoßen oder entscheidende Nachteile haben:

- Die Spülung mit Wasser verbraucht große Mengen an Energie, was sie eher unwirtschaftlich macht.
- Bei der Druckentlastung schwächt sich der Hydratzerfall mit der Zeit von selbst ab. Das hat mehrere Gründe: Erstens erhöht das Methangas, das sich beim Zer-

3.9 > Mit dem Forschungsschiff „Chikyu“ bohrten japanische Forscher im Februar 2012 südlich der Atsumi-Halbinsel nach Methanhydraten. im Jahr darauf förderte das Schiff ganz in der Nähe erstmals Methan durch eine Probebohrung an die Meeresoberfläche.

fall der Hydrate bildet, den Druck in der Lagerstätte, was den weiteren Zerfall der Hydrate erschwert. Zweitens werden durch den Zerfall der Hydrate Wassermoleküle frei. Dadurch süßt die Lagerstätte aus, was wiederum den Hydratabbau chemisch behindert. Drittens ist Energie nötig, um die Clathrate aufzulösen und die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen zu zerstören. Chemiker sprechen von einer endothermen, Energie zehrenden, Reaktion. Da diese Energie in Form von Wärme aus der Umgebung aufgenommen wird, kühlt sich die Umgebung ab. Auch das wirkt dem Zerfall der Hydrate entgegen.

- Das Injektionsverfahren wiederum läuft noch zu langsam ab. Verschiedene Forschergruppen versuchen daher, den Austausch von Kohlendioxid und Methan zu beschleunigen. Erste Erfolge gibt es bereits: Der Austausch von Kohlendioxid und Methan läuft schneller ab, wenn das CO_2 als warmes, überkritisches Fluid in die Lagerstätte eingebracht wird. Gegenüber der Druckentlastung hat das Injektionsverfahren den Vorteil, dass beim Austausch von Kohlendioxid und Methan etwas Wärme frei wird, die den Zersetzungsprozess aufrechterhält. Dieses Verfahren wird zurzeit von deutschen Forschern weiterentwickelt.

Asien engagiert sich besonders

Welche dieser Methoden künftig für eine Förderung in industriellem Maßstab am besten geeignet ist, ist derzeit ungewiss. Deshalb fließt weiterhin viel Geld in die Forschung. Bisher wurde weltweit fast 1 Milliarde US-Dollar in die Gashydratforschung investiert. Japan und Südkorea nehmen dabei eine Vorreiterrolle ein. In den kommenden Jahren werden diese beiden Staaten weitere Fördertests am Meeresboden durchführen. Auch in Taiwan, China, Indien, Vietnam und Neuseeland werden große Anstrengungen unternommen, um die heimischen Gashydratvorkommen im Meeresboden zu erschließen.

Die Suche geht weiter

Derzeit ist es das Ziel der Energiekonzerne und Wissenschaftler, vielversprechende Areale am Meeresboden genauer auf Methanhydratvorkommen zu untersuchen. Interessant sind Gebiete, in denen die Druck- und Temperaturverhältnisse günstig sind und in denen zugleich mächtige Sedimente vorkommen. Fachleute unterscheiden bei der Erkundung von Bodenschätzen allgemein zwei verschiedene Phasen: die Prospektion und die Exploration. Die Prospektion ist die Suche nach noch unbekannten Lagerstätten. Daran schließt sich die Exploration an, die genaue Untersuchung und Erschließung der gefundenen Lagerstätten und Rohstoffvorkommen. Nur wenn die Exploration zeigt, dass sich eine ausreichende Rohstoffmenge abbauen lässt, beginnt man mit der Erschließung. Areale wie das Ulleung-Becken vor Südkorea und der Nankai-Trog vor Japan sind bereits weitgehend exploriert. In den meisten anderen Gebieten wie etwa den Ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) von China, Indien, Neuseeland oder Taiwan wird derzeit noch prospektiert.

Für die Prospektion und Exploration von Methanhydratlagerstätten kommen heute sowohl etablierte Verfahren aus der Gas- und Ölindustrie als auch neue Technologien zum Einsatz, die in den vergangenen 5 Jahren unter anderem in einem deutschen Verbundprojekt entwickelt wurden, in dem rund 20 Partner aus Hochschulen und der Industrie zusammenarbeiten.

Erst die Suche ...

Folgende etablierte und neue Verfahren und Messinstrumente werden derzeit für die Prospektion von Methanhydraten eingesetzt:

COMPUTERSIMULATION: Seit vielen Jahren setzt man in der Gas- und Ölförderung Simulationsprogramme ein, mit denen sich am Computer ermitteln lässt, in welchen Meeresgebieten mit hoher Wahrscheinlichkeit Gas- und Ölvorräte vorkommen. Diese Programme berücksichtigen bei der Berechung unter anderem, wie stark sich in den verschiedenen Meeresgebieten im Laufe von Jahrmillionen Plankton zu Sedimenten abgelagert hat, wie mächtig die Schichten sind und welche Drücke und Temperaturen in der Tiefe herrschen. Die Simulationen liefern einen ersten Hinweis darauf, wo sich eine weitere Prospektion mit Forschungsschiffen lohnen könnte. Deutsche Wissenschaftler und ein Softwarehersteller haben gemeinsam in den vergangenen 5 Jahren ein bewährtes Computerpro-

Kritischer Punkt
Setzt man ein Gas unter hohen Druck, verflüssigt es sich für gewöhnlich. Erhöht man den Druck und zugleich die Temperatur, erreicht das Gas hingegen eine Art Zwitterzustand zwischen gasförmig und flüssig. Fachleute bezeichnen diesen als kritischen Punkt eines Gases. Das Gas wandelt sich in ein Fluid.
Erhöht man Druck oder Temperatur weiter, spricht man vom überkritischen Zustand beziehungsweise überkritischen Fluid. Dieses überkritische Fluid ist besonders reaktionsfreudig. Überkritisches CO_2 beispielsweise reagiert intensiv mit den Methanhydraten, sodass schnell viel Methan freigesetzt wird.

Von der Kunst, in weichen Sedimenten zu bohren

Methanhydratlagerstätten sind anders als konventionelle Erdgas- und Erdöllagerstätten. Letztere liegen meist mehrere Kilometer tief in Jahrmillionen alten Sedimenten, die im Laufe der Zeit zu festem Gestein zusammengepresst wurden. Damit sind diese Lagerstätten in der Regel auch von festen, undurchlässigen Gesteinsschichten überdeckt. Methanhydrate hingegen befinden sich in sehr viel jüngeren, eher weichen Sedimenten. Die konventionelle Bohrtechnik ist zum einen sehr teuer und zum anderen für die Erschließung der Gashydratvorkommen in weichen Sedimenten ungeeignet. Deutsche Forscher und Unternehmen wollen deshalb eine kleine Bohrplattform entwickeln, die man am Meeresboden absetzen kann und auf der Bohrer, Pumpen und Stromversorgung befestigt werden können. Auf diese Weise kann die Anlage in der Tiefe weitgehend autark arbeiten und das Methan aus den Hydratlagerstätten fördern. Einen Vorläufer dieser mobilen Bohreinrichtung (MARUM-MeBo) gibt es bereits. Er wird seit einigen Jahren auf Forschungsschiffen für Explorationsbohrungen in bis zu 2000 Meter Wassertiefe eingesetzt und kann etwa 100 Meter tief in den Meeresboden bohren. Zurzeit wird die nächste MeBo-Generation gebaut, die Sedimenttiefen von bis zu 200 Metern ereichen kann. In den kommenden Jahren soll dieses Gerät weiterentwickelt und im Meer getestet werden. Methanhydratlagerstätten könnte man künftig mit einem Ensemble dieser kleinen und im Vergleich zu großen Bohrinseln relativ preiswerten Bodenförderanlagen ausbeuten. Die Geräte haben den Vorteil, dass sie von jedem Mehrzweck- oder Forschungsschiff auf den Meeresboden gesetzt werden können. Teure Einsätze von Bohr- oder Spezialschiffen wären nicht nötig.

3.10 > Das Unterwassergerät MARUM-MeBo wird seit mehreren Jahren für Bohreinsätze am Meeresgrund genutzt. Es lässt sich flexibel auf verschiedenen Forschungsschiffen einsetzen. Mit ähnlichen Geräten könnten künftig Methanhydrate abgebaut werden.

Bevor ein Unternehmen heute mit der Ausbeutung einer Erdgas- oder Erdöllagerstätte beginnt, wird die Förderung generell zuerst am Computer simuliert. Für Gas und Öl gibt es dafür bereits ausgereifte Simulationsprogramme, die ermitteln, wie sich der Druck in einer Lagerstätte innerhalb von 5 bis 10 Jahren verändert – und wie stark dadurch die Förderrate im Laufe der Zeit abnimmt. Die etablierten Simulationsprogramme berücksichtigen unter anderem die Geometrie der Lagerstätte und Temperaturen. Ein Forschungsinstitut arbeitet derzeit an einer Softwareversion, die auch die Methanhydratförderung simulieren kann. Noch muss die Software mit realen Messdaten aus dem Meer und dem Labor gefüttert werden. Dazu zählen unter anderem Informationen über die Bildungs- und Zerfallszeiten von Hydraten. In etwa 2 Jahren soll die Software einsatzbereit sein. Ihre Stärke ist, dass sie auch kleine Lagerstätten von nur etwa 1 Quadratkilometer Größe im Detail simulieren kann, also eine gute räumliche Auflösung hat.

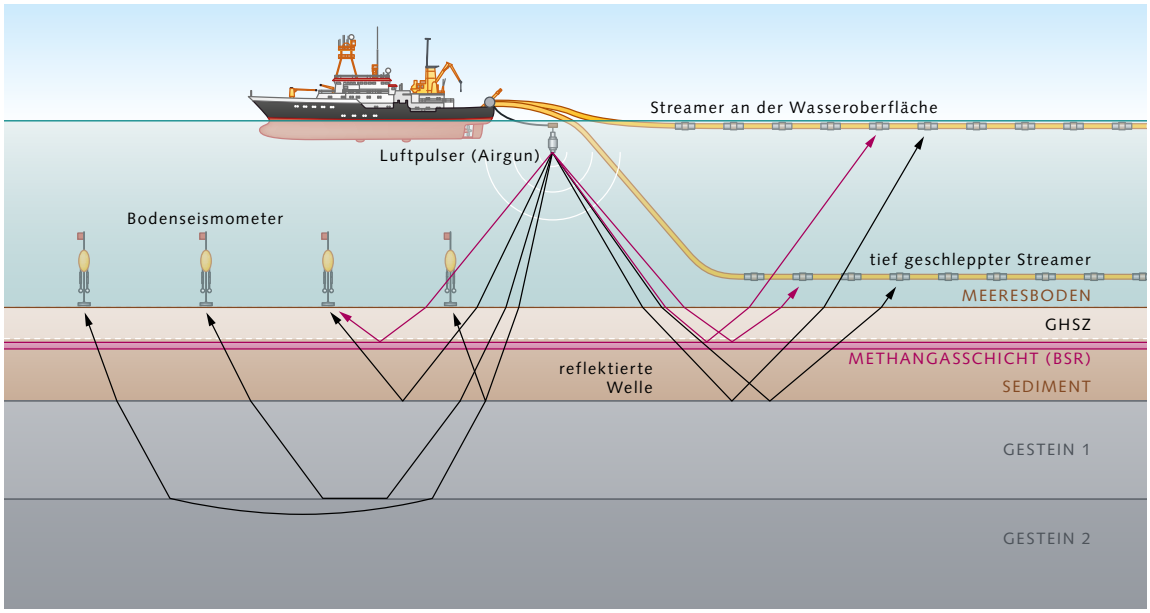
gramm für die Gas- und Ölindustrie um ein Simulationsmodul für Methanhydrat erweitert. Dieses neu entwickelte Modul berücksichtigt die besonderen, für die Bildung von Methanhydrat erforderlichen Umgebungsbedingungen und gibt wichtige Hinweise auf mögliche, bislang unentdeckte Hydratvorkommen.

FÄCHERECHOLOT: Mit diesem neuen akustischen Gerät lassen sich Methangasblasen aufspüren, die durch natürliche Lecks aus Methanlagerstätten ins Meer austreten. Es wird unter dem Schiff befestigt und sendet Ultraschallstrahlen fächerartig aus. So kann es mehrere Hundert Meter breite Streifen am Meeresboden scannen. Die Herausforderung beim Einsatz dieser Geräte besteht unter anderem darin, die Reflexionssignale der Bläschen von zahlreichen Störsignalen im Echolotbild zu trennen. Dazu wurde von den beteiligten Wissenschaftlern eine spezielle Software entwickelt. Das Fächerecholotsystem lässt sich in einer frühen Phase der Prospektion einsetzen. Die detektierten Methangasblasen im Wasser geben einen ersten Hinweis darauf, dass sich im Sediment Methanhydrate befinden.

METHANSENSOR: Lange Zeit gab es kein Messverfahren, mit dem sich die Methankonzentration direkt im Meerwasser bestimmen ließ. Forscher mussten Wasserproben aus verschiedenen Meerestiefen an Bord ziehen und im Labor untersuchen. Seit Kurzem aber ist ein versenkbares Minilabor von der Größe einer Tapetenrolle auf dem Markt. Dieses saugt das Meerwasser ein und ermittelt die Methankonzentration direkt im Meer. Die Messdaten werden über ein Kabel zum Schiff übertragen. Der Sensor ergänzt das Fächerecholot, weil er die Methankonzentration in der Tiefe sehr viel genauer bestimmen kann.

MEHRKANALSEISMIK: Bei seismischen Verfahren werden mit Airguns (Luftpulser) akustische Wellen erzeugt, die in den Meeresboden eindringen und dort von verschiedenen Schichten unterschiedlich stark reflektiert oder gebrochen werden. Empfänger, die an einem hinter dem Schiff hergezogenen, häufig mehrere Kilometer langen Messkabel montiert sind, sogenannte Streamer, nehmen die reflektierten Wellen auf. Die Daten aller Empfänger (Kanäle) werden dann zu einem Abbild des Meeresbodens verrechnet. Sind Abstände von 12 Metern bei der Anordnung der Empfänger in der Öl- und Gasprospektion durchaus ausreichend, so wurden für die Suche nach Methanhydratvorkommen Streamer entwickelt, in denen die Empfänger nur 1,5 Meter Abstand haben. Diese sorgen für eine höhere Auflösung und ermöglichen es, den Meeresboden in einem feineren Raster abzubilden. Auch die Mehrkanalseismik wird in der frühen Phase der Prospektion eingesetzt. Mit ihr lässt sich unter anderem der Bottom Simulating Reflector (BSR, den Meeresboden simulierender Reflektor) aufspüren. Dabei handelt es sich um eine starke Reflexion der akustischen Wellen, die im seismischen Bild als auffällige helle Schicht zu erkennen ist. Dieser Effekt tritt in verschiedenen Typen von Sedimenten auf. Im Fall der Methanhydrate wird die starke Reflexion durch freies Methangas unterhalb der Gashydratstabilitätszone erzeugt. HIer ist die Temperatur zu hoch, als dass sich Methanhydrat bilden könnte. Deshalb sammelt sich dort Methangas, das aus den Tiefen des Sediments aufsteigt. Da es eine sehr viel geringere Dichte als das Methanhydrat beziehungsweise das umgebende Sediment hat, hebt es sich in den seismischen Bilddaten als BSR deutlich von den anderen Schichten ab.

3.11 > Bei der 3-D-Seismik werden mehrere parallele Streamerketten hinter dem Schiff hergezogen. Da die Empfänger jeweils leicht versetzt aus unterschiedlichen Winkeln Signale vom Meeresboden empfangen, ergibt sich insgesamt ein räumliches Bild des Bodens.



3.12 > Bei der Mehrkanalseismik erzeugen Airguns (Luftpulser) Schallwellen, die im Meeresboden an verschiedenen Schichten unterschiedlich reflektiert werden. Die Reflexionen werden von Empfängern wahrgenommen, die am Meeresboden verankert sind (Bodenseismometer) oder an einer Messkette (Streamer) hinter einem Schiff hergezogen werden. Mit tief geschleppten Streamern lassen sich seismische Bilder mit besonders hoher Auflösung gewinnen.

TIEF GESCHLEPPTE STREAMER: Um eine höhere Auflösung des seismischen Bildes zu erreichen, kann man Streamer auch in einem geringeren Abstand zum Meeresboden durchs Wasser ziehen, beispielsweise 100 Meter über dem Meeresboden. Der Vorteil: Durch die Nähe zum Boden haben die Streamer einen Weitwinkelblick in den Boden. Dadurch können sie sogar schräg unter harte Bakterienkrusten blicken, die sich auf natürliche Weise in manchen Meeresgebieten bilden. Solche bakteriellen Krusten sind für seismische Wellen für gewöhnlich undurchdringlich.

3-D-SEISMIK: Sobald es erste Anzeichen auf mögliche Methanhydratvorkommen gibt, setzt man Systeme ein, mit denen man die Tiefe und Breite der Lagerstätten im Meeresboden dreidimensional erfassen kann. Bei diesen 3-D-Systemen schleppt man mehrere parallel angeordnete Streamer hinter dem Schiff her. Da die einzelnen Streamerketten aus leicht unterschiedlichen Winkeln in den Meeresboden blicken, liefern sie in der Summe einen räumlichen Eindruck. Die Auflösung der Systeme, die in den vergangenen 5 Jahren entwickelt wurden, ist beachtlich: Sie bilden den Meeresboden bis in eine Tiefe von 500 Metern in einem 3-mal-3-Meter-Raster ab. Damit lässt sich eine Lagerstätte wie eine große Blase abbilden. Mit solchen 3-D-Verfahren lassen sich darüber hinaus sowohl Brüche in der Lagerstätte erkennen, durch die Methan austreten kann, als auch große Methangasblasen in der Nähe solcher Brüche detektieren. Außerdem liefert die 3-D-Seismik wichtige Informationen darüber, wo es sich lohnt, während der späteren Explorationsphase Bodenproben zu nehmen.

... dann die Erforschung

Durch die Prospektion wird zunächst geklärt, ob in einem bestimmten Gebiet überhaupt Methanhydratlagerstätten existieren. Ist man fündig geworden, beginnt die Exploration, die genaue Untersuchung dieser Meeresgebiete. Mit Explorationsmethoden kann man recht gut abschätzen, wie viel Methan oder Methanhydrat in einer Lagerstätte vorhanden ist. Folgende Verfahren und Hilfsmittel werden derzeit für die Exploration der Methanhydrate eingesetzt:

BOHRKERNE: Eine klassische Methode für die Exploration von Bodenschätzen ist die Entnahme von Bohrkernen. Von einem Forschungsschiff aus werden mit einem Bohrgestänge aus einer Sedimenttiefe von vielen Hundert Metern Bohrkerne entnommen. Diese langen Bohrkerne

von der Dicke einer Dachrinne werden an Bord des Forschungsschiffs in mehrere Meter lange Abschnitte zerteilt und später im Labor an Land auf Einschlüsse von Methanhydraten untersucht. Mit speziellen druckregulierten Bohrgeräten, die hohe Drücke aufrechterhalten können, wenn die Methanhydratprobe nach oben gefördert wird, kann verhindert werden, dass sich das Methanhydrat zersetzt, bevor man den Bohrkern analysieren kann.

OZEANBODENSEISMOMETER: Ozeanbodenseismometer (OBS) arbeiten wie herkömmliche Seismometer. Die Empfänger befinden sich aber nicht in einem Streamer, sondern sitzen auf dem Meeresboden. Dadurch können größere Beobachtungsreichweiten erzielt werden. Schallwellen durchwandern Strukturen mit verschiedenen Dichten unterschiedlich schnell. In dichten Strukturen wie etwa Methanhydraten werden die Wellen beschleunigt. Weniger dichte Strukturen wie etwa schlammiges Sediment oder Gasblasen hingegen werden von den Wellen langsamer durchwandert. Aus den Verzögerungen der reflektierten Wellen errechnet das Bodenseismometersystem ein Abbild des Meeresbodens. Da die Geräte eine größere Reichweite erfassen als ein Streamer können sie Signale aus größerer Tiefe aufnehmen. Der Rekord liegt derzeit bei 12 Kilometern. Bodenseismometer sollen 2014 vor Korea zum Einsatz kommen.

ELEKTROMAGNETIK: Seit gut 10 Jahren werden in der Gas- und Ölindustrie auch elektromagnetische Systeme eingesetzt. Diese senden wie die Antenne eines Rundfunksenders elektromagnetische Impulse aus. Ähnlich wie die Schallwellen beim Bodenseismometer werden die elektromagnetischen Signale von verschiedenen Bodenstrukturen unterschiedlich stark verändert. Das physikalische Prinzip ist aber ein anderes. Das System macht sich zunutze, dass verschiedene Substanzen elektromagnetische Impulse unterschiedlich gut leiten. Schlecht leitende Substanzen erzeugen einen Widerstand. Flüssigkeiten wie zum Beispiel Wasser hingegen leiten sehr gut. Diese unterschiedlichen Widerstände beziehungsweise Leitfähigkeiten im Boden nimmt das System sehr genau wahr. Mit elektromagnetischen Verfahren lässt sich daher exakt feststellen, wie viel Methangas frei im Sediment unterhalb der GHSZ oder in den Hydraten enthalten ist. Doch die Methode hat auch Nachteile. Erstens breitet sich die elektromagnetische Welle, anders als der gerichtete Knall von Airguns, kreisförmig aus. Die Leitfähigkeitsmesswerte und damit auch die Methanvorkommen lassen sich daher nur schlecht lokalisieren. Zudem werden die elektromagnetischen Impulse schnell abgeschwächt. Sie können nicht so tief in den Meeresboden eindringen wie Schallwellen. In den vergangenen 5 Jahren wurde deshalb ein mathematisches Verfahren entwickelt, das Elektromagnetik und Seismik miteinander verknüpft. Dieses sogenannte Joint-Inversion-Verfahren nutzt damit die Stärken beider Verfahren: die sehr gute räumliche Auflösung des Bodenseismometers und die präzisen Leitfähigkeitsmesswerte der elektromagnetischen Systeme, die Aufschluss über den Methangehalt geben. Dank Joint-Inversion lassen sich Methanhydratlagerstätten damit sehr viel besser als bisher einschätzen.

Vor Taiwan soll das Joint-Inversion-Verfahren 2014 zum Einsatz kommen, um die Bildung von Gashydraten zu erforschen. Diese Insel ist besonders interessant, weil sie sich an einer Subduktionszone befindet, in der methanhaltiges Wasser aus dem Sediment gepresst wird. Bis heute ist noch ungeklärt, wie groß die Menge an Methan ist, die in den Subduktionszonen frei wird. Das erschwert die Abschätzung der weltweiten Hydratmengen. Eine genaue Analyse der Subduktionszonen vor Taiwan und der Methanmengen, die dort freigesetzt werden, könnte dabei helfen, die Vorkommen künftig genauer zu berechnen.

3.13 > Methanhydratbrocken in einem Bohrkern

Die Folgen des Hydratabbaus

> Welche Gefahren der Methanhydratabbau mit sich bringt, war lange unklar. Heute herrscht die Auffassung, dass Bohrungen weder Tsunamis auslösen noch Lecks im Sediment verursachen, durch die klimaschädliches Methan in größeren Mengen ins Meer und in die Atmosphäre entweichen könnte.

Die Angst vor Katastrophen

In den vergangenen Jahren wurde in der Fachwelt kontrovers diskutiert, inwieweit der Methanhydratabbau negative Folgen für die Meeresumwelt und das Klima haben könnte. Befürchtet wurde, dass durch den Abbau der Hydrate große Mengen Methan unkontrolliert frei werden und in die Atmosphäre aufsteigen könnten. Das wäre fatal, denn Methan hat eine etwa 20-mal stärkere Treibhauswirkung als Kohlendioxid. Eine verstärkte Freisetzung aus den Meeren, sagten manche Forscher, könnte den Treibhauseffekt verstärken.

Diskutiert wurde auch, ob durch den Abbau der Hydrate steile Kontinentalabhänge abrutschen könnten. Wie Lawinen im Gebirge kommen solche Hangrutschungen auch im Meer natürlich vor. Sie ereignen sich an Kontinentalrändern, an denen sich viel Sediment ablagert, beispielsweise vor den großen Flussmündungen, durch die viele Schwebstoffe herantransportiert werden. Wie der Schnee im Gebirge wird die Sedimentschicht irgendwann so schwer, dass sie in die Tiefe abrutscht. Gashydrate verkitten die Poren zwischen den feinen Sedimentpartikeln und stabilisieren so den Meeresboden. Löst man die Methanhydrate auf, sagten manche Forscher, würde der Boden an Festigkeit verlieren. Im schlimmsten Fall, so wurde befürchtet, könnten riesige Sedimentpakete abrutschen und an den Küsten schwere Tsunamis auslösen.

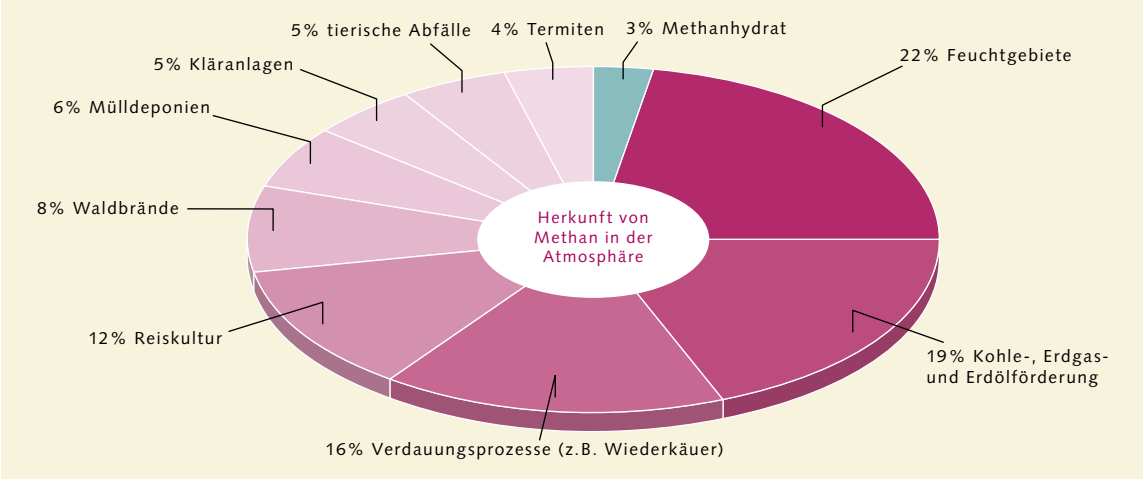
Umweltprobleme durch Hydratabbau?

Dass Hänge rutschen, ist nicht ungewöhnlich. Es gibt sogar wissenschaftliche Beweise dafür, dass durch Hangrutschungen große Tsunamis ausgelöst wurden. Ein Beispiel ist die Storegga-Rutschung vor Norwegen, bei der vor 7000 Jahren ein großer Teil des norwegischen Kontinentalabhangs in die Tiefe glitt. Die Bewegung war so groß, dass sich an der schottischen Küste 20 Meter hohe Wellen aufbauten. Mit Methanhydraten aber hat dieses Ereignis nichts zu tun. Der Storegga-Hang kam ins Rutschen, weil sich die skandinavische Kontinentalplatte nach der Eiszeit langsam zu heben begann. Dabei brach ein Teil des Hangs ab. Derart große Rutschungen sind sehr seltene Ereignisse, die sich nur alle paar Tausend Jahre ereignen.

Kleinere Hangrutschungen treten dagegen sehr häufig auf. Es gibt weltweit also durchaus eine gewisse Zahl an kritischen Hängen, an denen sich so viel Sediment abgelagert hat, dass bereits eine kleine Störung genügt, um eine Rutschung auszulösen. Bevor also nach Methanhydrat gebohrt wird, müssen die Bohrstellen deshalb intensiv untersucht werden. Künftig werden dem Methanhydratabbau daher, so sagen Wissenschaftler, Umweltverträglichkeitsprüfungen vorausgehen, mit denen man das Risiko von Rutschungen einschätzen kann. Einheitliche Standards, nach denen Methanhydratgebiete begutachtet werden, müssen zunächst aber noch entwickelt werden. Wie die Beispiele Japan und Korea zeigen, werden die ersten Staaten, die in den Methanhydratabbau einsteigen, vorerst flache Meeresgebiete wie zum Beispiel Meeresbecken wählen, um das Risiko von Hangrutschungen weitgehend auszuschließen.

Auch wenn gilt, dass durch den vergleichsweise kleinräumigen Methanhydratabbau keine Hangrutschungen ausgelöst werden, die zu Tsunamis führen könnten, so haben vor dem Hintergrund der immensen Investitionskosten die beteiligten Unternehmen dennoch wenig Interesse daran, es überhaupt dazu kommen zu lassen. Zu teuer ist die Bohrtechnik, die dann am Meeresboden zerstört werden würde.

Das Risiko von Hangrutschungen beim Hydratabbau lässt sich durch den Einsatz von Kohlendioxid verringern. Bei diesem Verfahren verdrängt das Kohlendioxid das



3.14 > Das Methan in der Atmosphäre stammt überwiegend aus Quellen an Land – insbesondere aus Feuchtgebieten. Die Methanhydrate im Meer tragen nur einen kleinen Teil. Auch durch die Erderwärmung wird sich dieser Anteil nicht wesentlich erhöhen.

Methan aus dem Hydrat, um dann selbst mit dem Wasser eine festes Hydrat zu bilden, das die Sedimente wieder stabilisiert.

Punktuelle Störungen

Auch in anderer Hinsicht halten Experten heute den Methanhydratabbau für eher unproblematisch: Anders als bei Massivsulfiden und Manganknollen werden die Lebensräume am Meeresboden durch den Abbau von Methanhydrat nur punktuell gestört, da hier keine großen Massen bewegt werden müssen. Lediglich in der unmittelbaren Umgebung der Bohrstellen wird Sediment aufgewühlt.

Selbst wenn man während der Erschließungsphase der Lagerstätte mehrere Bohrungen vornehmen muss, sind die Störungen relativ gering. Erfahrungen aus der Gas- und Ölindustrie zeigen, dass die Meeresumwelt – abgesehen von Unglücken in der Größenordnung der Plattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko – durch die Bohrungen grundsätzlich nicht messbar beeinträchtigt wird.

Gelangt Methan in die Atmosphäre?

Die Vorstellung, dass Methan in großen Mengen aus den Meeren aufsteigt, ist alt. Eine Zeit lang hatte man sogar versucht, das mysteriöse Verschwinden von Schiffen im Bermudadreieck damit zu erklären. Sie sollen, so die Theorie, von riesigen, vom Meeresgrund aufsteigenden Methanblasen verschluckt worden und in die Tiefe gefallen sein. Heute gilt als sicher, dass sich aus Hydraten keine derart großen Blasen lösen können. Auch werden beim Abbau der Hydrate keine großen Methangasmengen unkontrolliert bis in die Atmosphäre aufsteigen. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Forscher empfehlen, nur solche Methanhydratlagerstätten abzubauen, die von einer mindestens 100 Meter dicken Sedimentschicht bedeckt sind. Diese verhindert, dass Methanblasen, die sich in der Nähe der Bohrung bilden, durch das Sediment ins Wasser gelangen.
- Anders als Erdgas oder Erdöl schießt das Methan nicht von allein aus dem Bohrloch. Das Hydrat muss nach und nach aufgelöst werden. Entsprechend wird das Methan nur langsam frei. Ein Blowout wie bei der Explosion der Ölplattform „Deepwater Horizon“ im Jahr 2010 ist daher nicht zu befürchten. Es werden keine großen Methangasmengen frei, die bis zur Oberfläche aufsteigen könnten.

Sollte beispielsweise durch eine schlecht abgedichtete Bohrung dennoch Methan aus dem Sediment ins Meer austreten, wird – wenn überhaupt – nur ein sehr geringer Teil des Methans bis in die Atmosphäre aufsteigen können. Immerhin liegen die meisten Hydratvorkommen in 500 bis 3000 Meter Wassertiefe. Methan, das bei einer

Treibhauseffekt
Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2), Methan und andere klimarelevante Spurengase in der Atmosphäre lassen die kurzwellige Strahlung, die von der Sonne auf die Erde trifft, zunächst passieren. Diese wird an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und zu einem großen Teil als langwellige Strahlung zurückgeworfen. Wie die Glasscheibe eines Treibhauses verhindern aber die Gase, dass die langwellige Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Die Erde heizt sich auf.

Bohrung aus dieser Tiefe aufsteigt, ist aufgezehrt, ehe es die Wasseroberfläche erreicht. Das gilt auch für den Fall, dass beim Abbau der Hydrate in natürlichen Brüchen und Rissen im Boden gebohrt wird. Baut man Methanhydrat versehentlich in solchen Regionen ab, könnte das Methan durch diese Störstellen ins Wasser entweichen. Mit modernen Explorationsverfahren lassen sich diese Störstellen aber sicher detektieren, sodass versehentliche Bohrungen in Brüchen vermieden werden.

Verstärkt die Erderwärmung den Zerfall der Methanhydrate?

Weil Methan ein starkes Treibhausgas ist und man heute davon ausgeht, dass es zu 15 Prozent zum Treibhauseffekt beiträgt, haben Forscher in den vergangenen Jahren versucht abzuschätzen, wie viel Methan jährlich in die Atmosphäre freigesetzt wird. Als Hauptquelle gelten heute Feuchtgebiete, in denen abgestorbene Pflanzenreste in großen Mengen von Methan erzeugenden Bakterien abgebaut werden. Weitere Quellen sind die Mägen von Rindern und anderen Wiederkäuern, aber auch Reiskulturen sowie die Förderung von Gas und Öl. Kontrovers diskutiert wurde und wird, ob und wie viel Methan künftig zusätzlich durch die Klimaerwärmung frei wird. Bei ihren Berechnungen berücksichtigen die Forscher vier verschiedene Typen von Methanhydratlagerstätten an Land und im Meer:

IN PERMAFROSTGEBIETEN AN LAND: Solche Methanhydratlagerstätten kommen beispielsweise in Alaska, Kanada oder Sibirien vor. Man schätzt, dass sie nur etwa 1 Prozent der weltweiten Methanhydratmengen enthalten. Entsprechend gering wäre ihre Einfluss auf das Klima. In den meisten dieser Regionen liegen die Methanhydratlagerstätten mehr als 300 Meter tief. Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass durch eine Erwärmung höchstens die oberen Schichten der Methanhydrate antauen könnten. Dieser ganze Prozess dürfte sich über mehrere Tausend Jahre hinziehen. Seltener sind flache Methanhydratvorkommen in einer Tiefe von etwa 20 Metern. Diese Bereiche wären von der Klimaerwärmung sehr viel stärker betroffen. Allerdings sind die Methanmengen in der Summe gering.

IN ÜBERFLUTETEN PERMAFROSTGEBIETEN AUF DEM ARKTISCHEN SCHELF: Als der Meeresspiegel nach der letzten Eiszeit langsam stieg, wurden Permafrostgebiete in der Arktis überflutet. Da das Wasser mit knapp über 0 Grad Celsius deutlich wärmer als die arktische Luft ist, begann der überflutete Permafrostboden langsam zu tauen. Das Auftauen hat sich im Laufe von mehreren Tausend Jahren in die Tiefe ausgedehnt und die Gashydratstabilitätszone (GHSZ) erreicht. Die Hydrate zerfallen langsam und setzen Methan frei. Dieser Prozess läuft an vielen Stellen im Meeresboden ab, etwa auf dem Sibirischen Schelf, wo Methan aus dem Meeresgrund aufsteigt. Der Einfluss der durch den Menschen verursachten Klimaerwärmung auf diesen Prozess wird verschwindend gering bleiben. Wie Computermodelle zeigen, werden – wenn überhaupt – nur jene Methanhydrate antauen, die in geringer Tiefe von 10 bis 20 Metern im Sediment liegen. Solche flachen Vorkommen sind aber selten. Da das Wasser in den Schelfgebieten relativ flach ist, würde dieses Methan aber durchaus bis in die Atmosphäre gelangen. Man schätzt, dass die überfluteten Permafrostböden in den arktischen Schelfgebieten weniger als 1 Prozent der weltweiten Methanhydratmengen enthalten.

AN KONTINENTALRÄNDERN (OBERE RÄNDER DER GHSZ): Diese Methanhydratlagerstätten befinden sich exakt in jener Wassertiefe, in der die GHSZ beginnt – meist in einer Tiefe von 300 bis 500 Metern. Diese Vorkommen sind von der Meereserwärmung besonders betroffen, da sie am oberen Rand der GHSZ liegen. Bereits bei einer minimalen Erwärmung würden sie beginnen, sich aufzulösen. In anderen Regionen blockieren heute Gashydrate wie eine Art Pfropf tiefer liegende Methangasblasen. Auch diese Pfropfen könnten sich lösen. Dadurch würde zusätzlich Methangas frei. Man schätzt, dass die Vorkommen an den Kontinentalrändern beziehungsweise an den oberen Rändern der GHSZ etwa 3 Prozent der weltweiten Methanhydratmengen enthalten.

AN TIEFEN KONTINENTALRÄNDERN: Der größte Teil der Methanhydratvorkommen, nämlich rund 95 Prozent, kommt in Sedimenten in den tiefen Bereichen der Kontinentalränder zwischen 500 und 3000 Metern vor, wo hohe Wasserdrücke herrschen. Die Erwärmung des Meer-

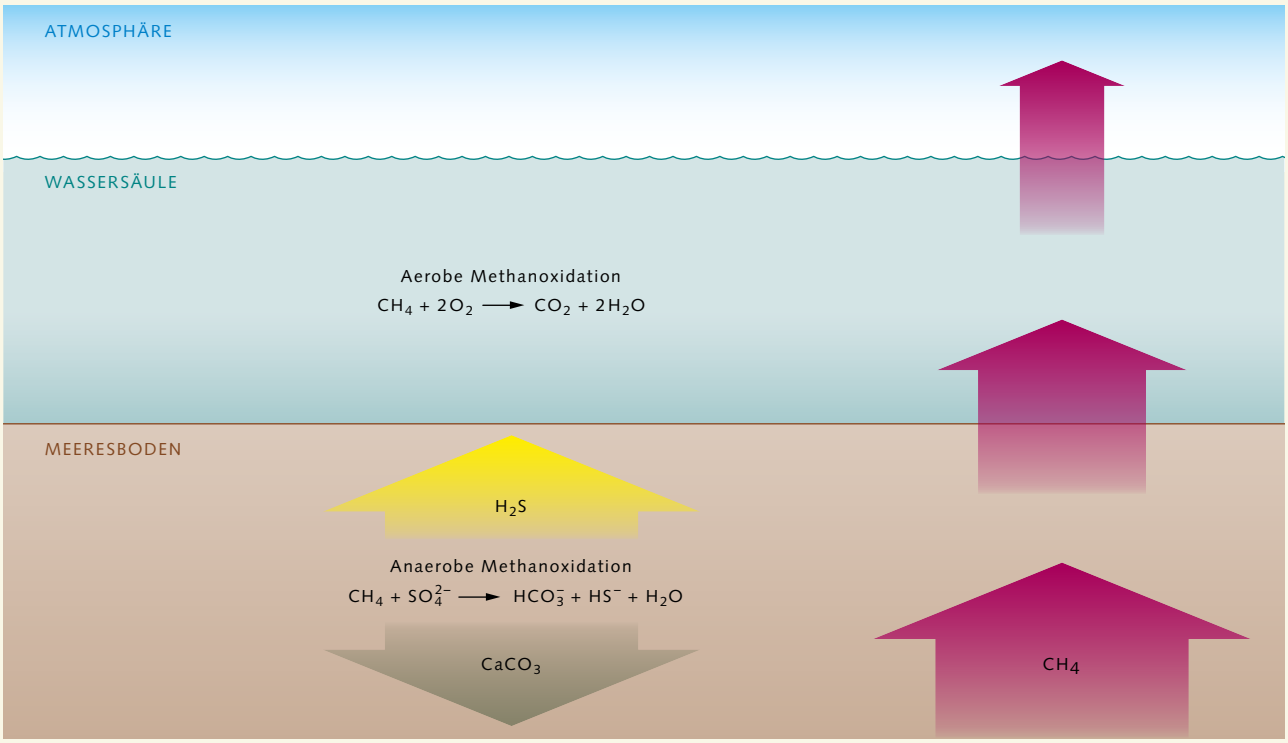
Bakterien verarbeiten Methan

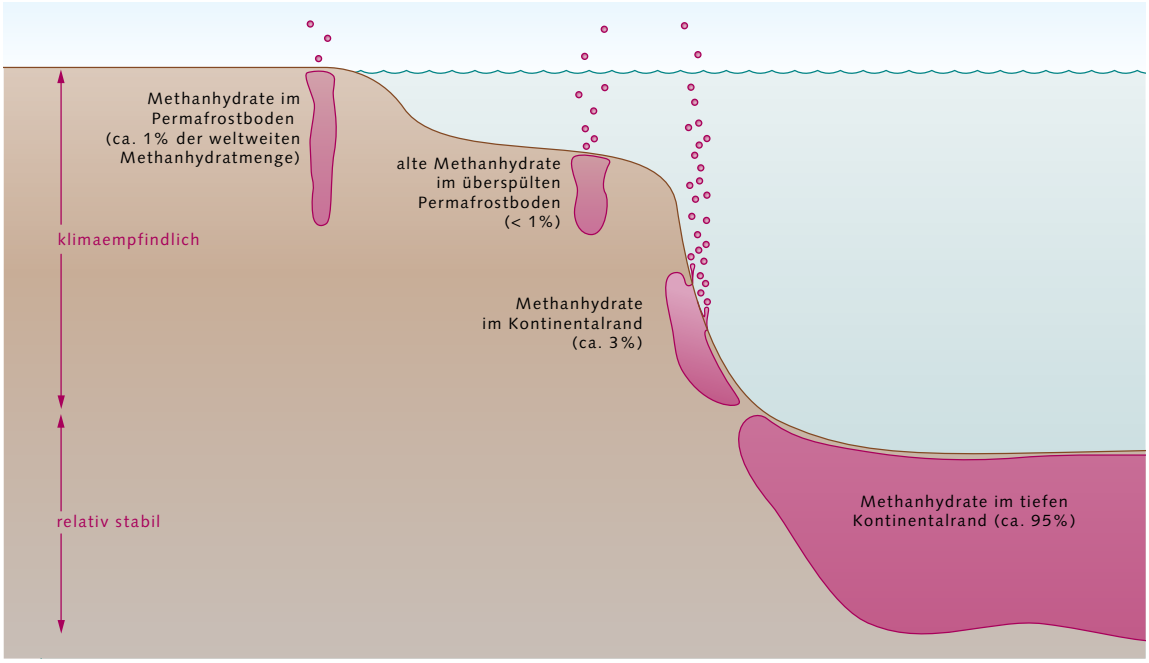
Methan, das aus den Sedimenten aufsteigt, wird zu einem großen Teil von Mikroorganismen aufgezehrt, die in den oberen Schichten des Meeresbodens und im Wasser leben. Im Meeresboden sind Bakterien aktiv, die ohne Sauerstoff, anaerob, leben. Die anaeroben Bakterien verarbeiten das Methan mithilfe von Sulfat (SO_4^{2-}). Dabei entstehen Hydrogensulfidanionen (HS^-) und Schwefelwasserstoff (H_2S) sowie Bikarbonat (HCO_3^-) Das Bikarbonat kann mit Kalziumionen (Ca^{2+}) zu Kalk, Kalziumkarbonat ($CaCO_3$), reagieren und sich im Meeresboden ablagern.

Im Meerwasser hingegen sind aerobe Bakterien aktiv, die Sauerstoff benötigen. Sie wandeln das Methan (CH_4) mit Sauerstoff (O_2) zu Kohlendioxid und Wasser (H_2O) um. Das Methan wird auf seinem Weg aus dem Boden durch das Meerwasser also langsam abgebaut. Je größer die Tiefe ist, aus der das Methan aufsteigt, desto länger ist sein Weg und desto weniger Methan erreicht die oberen Wasserschichten oder die Atmosphäre. Zu bedenken ist aber, dass vor allem der aerobe Methanabbau die Chemie des Meerwassers verändern kann. Zum einen nimmt die Sauerstoffkonzentration im Wasser ab, weil der Sauerstoff mit Methan reagiert. Das kann problematisch sein, weil viele Meereslebewesen in sauerstoffarmen Zonen nicht überleben können. Zum anderen bildet das entstehende CO_2 im Wasser Kohlensäure, was zu einer Versauerung des Meerwassers führt.

Die Explosion der Ölplattform „Deepwater Horizon" im Golf von Mexiko im April 2010 aber hat gezeigt, dass die Auswirkungen der veränderten Meereschemie kleinräumig und eher gering sind. Bei dem Unglück waren neben dem Öl große Mengen Methan ins Wasser gelangt. Nach dem Unglück konnten Wissenschaftler in der Nähe der Bohrinsel eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration messen. Die Veränderungen waren allerdings sehr gering, und eine Beeinträchtigung der Meereslebewesen ließ sich nicht nachweisen. Allerdings lässt sich nicht ausschließen, dass Meerestiere in der Nähe von Methanquellen aufgrund des niedrigen Sauerstoffgehalts und der Versauerung unter Stress geraten und dadurch langsamer wachsen oder sich schlechter vermehren. In der Nähe der Mittelmeerinsel Ischia beispielsweise versauert das Wasser in der Nähe vulkanischer Quellen. In diesen Bereichen wird das Wachstum von Schneckengehäusen beeinträchtigt.

3.15





3.16 > Methanhydrate kommen weltweit in verschiedenen Typen von Lagerstätten vor. Diese sind vom Klimawandel und der Erderwärmung unterschiedlich stark betroffen. Das meiste Methanhydrat findet sich in der Tiefsee. Damit ist es vor dem Zerfall weitgehend geschützt.

wassers durch den Klimawandel hat kaum einen Einfluss auf die Stabilität der Hydrate. Erstens sind die Drücke so hoch, dass eine geringe Temperaturerhöhung nicht reicht, um die Hydrate zu lösen. Zweitens wird es viele Jahrtausende dauern, bis sich die Erwärmung vom Oberflächenwasser bis in die Tiefe beziehungsweise ins Sediment fortgesetzt hat.

Wie hoch die jeweiligen Anteile im Detail tatsächlich sind, lässt sich heute nicht mit Gewissheit sagen, da viele Meeresgebiete noch nicht ausreichend erforscht worden sind. Die meisten Wissenschaftler stimmen aber darin überein, dass sich durch den Klimawandel keine katastrophale Massenschmelze von Methanhydraten ereignen wird, weil die bei Weitem größte Hydratmenge in den tiefen Bereichen der Kontinentalhänge lagert. Diskutiert wird aber, ob im Laufe der Erdgeschichte schon einmal Methan aus Hydraten in Massen freigesetzt worden ist. Demnach sollen bereits vor Millionen von Jahren Klimaerwärmungen immer wieder einmal zu plötzlichen Massenschmelzen geführt haben. In einer Kettenreaktion habe das Methangas die Erde dann noch weiter aufgeheizt. Das könnte beim Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum (PETM) vor etwa 55 Millionen der Fall gewesen sein, sagen manche Forscher. Während des PETM stieg die Temperatur weltweit innerhalb von 20 000 Jahren um durchschnittlich 6 Grad Celsius an. Das ist ein hoher Wert, wenn man bedenkt, dass Klimaforscher heute bereits bei einem globalen Temperaturanstieg von wenig mehr als 2 Grad erhebliche Klimaveränderungen erwarten. Die Ursachen des PETM werden von den Forschern kontrovers diskutiert. Einige Wissenschaftler halten es für möglich, dass die Methangasfreisetzung das PETM ausgelöst oder zumindest verstärkt haben könnte.

Für die nächsten Jahrhunderte gehen Experten davon aus, dass die Gashydratzersetzung nur wenig zur globalen Erwärmung beitragen wird. Betrachtet man aber längere Zeiträume von mehreren Jahrtausenden, könnte sich die Methanfreisetzung verstärken: Zunächst werden die vom Menschen verursachten, anthropogenen, CO_2-Emissionen zu einer lang anhaltenden Erwärmung führen, da das vom Menschen freigesetzte CO_2 auch in mehr als tausend Jahren noch zu einem großen Teil in der Atmosphäre vorhanden sein wird – lange nach einer Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen. Dadurch würden die Hydrate langsam zerfallen. Es ist also denkbar, dass die Langzeitwirkung der heutigen CO_2-Emissionen die Gashydratzersetzung verstärkt, was den Treibhauseffekt weiter anheizen würde.

Conclusio

Wertvoller Rohstoff oder Treibhausgas?

Methanhydrate kommen überall auf der Welt an vielen Kontinentalrändern in 300 bis 3000 Meter Wassertiefe im weichen Meeresboden vor. Die größten Lagerstätten befinden sich unterhalb von 500 Metern. Methanhydrate bilden sich bei bestimmten Temperaturen und hohen Drücken aus Wasser und Methangas. Je wärmer das Wasser ist, desto höher muss der Wasserdruck sein und desto tiefer liegen die Vorkommen.

Nach den aktuellen Schätzungen enthalten die Hydratvorkommen weltweit rund 10-mal so viel Methangas wie herkömmliche Erdgaslagerstätten. Damit sind sie ein ernst zu nehmender Energierohstoff. Mit Testbohrungen hat man inzwischen gezeigt, dass sich Methanhydrate im Meeresboden abbauen lassen. Vor allem Staaten wie Japan oder Korea, die Energierohstoffe zum großen Teil einführen müssen, hoffen, dadurch künftig von teuren Gas- und Kohleimporten unabhängig zu werden. Noch aber gibt es keine Bohr- und Fördertechnik für den Routinebetrieb. Denn für den Abbau der Methanhydrate im weichen Sediment benötigt man andere Verfahren als bei der etablierten Gas- und Ölförderung im Meer. In den kommenden Jahren sollen die benötigten Bohrgeräte entwickelt werden. Erste Prototypen gibt es bereits. Zudem werden derzeit Machbarkeitsstudien ausgearbeitet. Angedacht sind kleine Förderanlagen, die auf den Meeresboden gesetzt werden.

Eine große Hürde besteht darin, dass das Methan in den Hydraten fest gebunden ist und anders als herkömmliches Erdgas nicht von allein ins Bohrloch strömt. Die Methanhydrate müssen an der Bohrstelle zunächst zersetzt werden, daher ist die Förderrate in Methanhydratlagerstätten geringer als bei der klassischen Erdgasförderung. Inwieweit sich die Hydratgewinnung in großer Tiefe wirtschaftlich lohnt, muss sich noch zeigen.

Da sich die Methanhydrate vor allem an den Kontinentalhängen bilden, fürchteten Kritiker, dass das weiche Sediment durch die Bohrungen ins Rutschen geraten könnte. Dadurch, hieß es, könnten Tsunamis ausgelöst werden. Geoforscher schließen das inzwischen aus. Lawinenartige Hangrutschungen seien ein natürliches Phänomen und durchaus häufig. Durch die Bohrungen könnten solche Rutschungen zwar grundsätzlich ausgelöst werden, doch wären diese zu klein und ihre Energie zu gering, als dass sie Tsunamis verursachen könnten.

Befürchtet wurde außerdem, dass durch das Bohren am Meeresboden Methan in großen Mengen unkontrolliert ins Wasser und schließlich in die Atmosphäre aufsteigen könnte. Da Methan ein starkes Treibhausgas ist, würde das die Erderwärmung verstärken. Wissenschaftler gehen davon aus, dass das nicht geschehen wird, da das in Hydraten gebundene Methan anders als Erdgas und Erdöl nicht von allein aus dem Bohrloch fließen kann. Es wird nach und nach freigesetzt, wenn das Hydrat beim Abbau im Boden langsam zerfällt. Ein Blowout wie an einem Ölbohrloch ist damit grundsätzlich nicht möglich. Selbst in dem Fall, dass Methan aus dem Meeresboden ins Wasser gelangt, wird es auf seinem langen Weg durch die Wassersäule von Bakterien abgebaut, ehe es die Meeresoberfläche erreicht.

Forscher gehen heute im Allgemeinen davon aus, dass die Erderwärmung in diesem und den nächsten Jahrhunderten nicht zu einer verstärkten Freisetzung von Methan führen wird. Betrachtet man jedoch lange geologische Zeiträume, sieht die Situation etwas anders aus. Im Laufe von Jahrtausenden könnten sich die Ozeane durch den Klimawandel so weit erwärmen, dass sich vor allem in flachen Meeresgebieten größere Mengen an Hydraten zersetzen und das Methan, da es auf dem kurzen Weg zur Meeresoberfläche nicht vollständig abgebaut wird, doch in die Atmosphäre gelangt.

Quellenverzeichnis

Kapitel 1 – Öl und Gas aus dem Meer

Bird, K.J., R.R. Charpentier, D.L. Gautier, D.W. Houseknecht, T.R. Klett, J.K. Pitman, T.E. Moore, C.J. Schenk, M.E. Tennyson & C.J. Wandrey, 2008: Circum-arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas North of the Arctic Circle. U.S. Geological Survey Fact Sheet, 3049.

BP p.l.c., 2012. BP Energy Outlook 2030.

BP p.l.c., 2012. Statistical Review of World Energy.

Brownfield, M.E., R.R. Charpentier, T.A. Cook, D.L. Gautier, D.K. Higley, M.A. Kirschbaum, T.R. Klett, J.K. Pitman, R.M. Pollastro, C.J. Schenk, M.E. Tennyson, C.J. Wandrey & K.J. Whidden, 2012. An estimate of undiscovered conventional oil and gas resources of the world. U.S. Geological Survey Fact Sheet, 3028.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2012. Öl im Meer – Risiken, Vorsorge und Bekämpfung, Tagungsband 2010. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 48.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Deutsche Rohstoffagentur, 2012. Energiestudie 2012 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. DERA Rohstoffinformationen, 15.

Camphuysen, K.C.J., M.S. Dieckhoff, D.M. Fleet & K. Laursen, 2009. Oil pollution and seabirds. Quality Status Report, Thematic Report No. 5.3., Wadden Sea Ecosystem, 25.

Clauss, G.F., J.Y. Lee & S. Kosleck, 2004. Offshore-Förderplattformen: Entwicklungen für die Tiefsee. 99. Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft Hamburg.

International Energy Agency, 2012. Key World Energy Statistics 2012.

International Energy Agency, 2012. World Energy Outlook 2012.

Musk, S., 2012. Trends in oil spills from tankers and ITOPF non-tanker attended incidents. International Tanker Owner Pollution Federation Ltd.

National Academy of Engineering & National Research Council, 2011. Macondo Well – Deepwater Horizon blowout – Lessons for improving offshore drilling safety.

National Oceanic and Atmospheric Administration (Restoration Center), 2012. Natural Resource Damage Assessment April 2012 – Status update for the Deepwater Horizon oil spill.

Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2012. World Oil Outlook 2012.

Rassenfoss, S., 2013. Well capping becomes an industry of its own. Journal of Petroleum Technology, 7: 40–47.

Research Council of Norway, 2012. Long-term effects of discharges to sea from petroleum-related activities – The results of ten years' research.

Susanne, P. de & J.-G. Peytavi, 2011. Toward operational oil spill response in West and Central Africa. International Oil Spill Conference.

U.S. Fish and Wildlife Service, 2010. Deepwater Horizon Response Consolidated Fish and Wildlife Collection Report.

Wassel, R., 2012. Lessons from the Macondo well blowout in the Gulf of Mexico. The Bridge, 42, 3: 46–53.

www.itopf.com/

www.ogp.org.uk/

Kapitel 2 – Tagebau am Meeresgrund

Angerer, G., L. Erdmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Scharp, A. Lüllmann, V. Handke & M. Marwede, 2009. Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale".

Bachraty, C., P. Legendre & D. Desbruyères, 2009. Biogeographic relationships among deep-sea hydrothermal vent faunas at global scale. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 56, 8: 1371–1378.

Boyd, S. E., D.S. Limpenny, H.L. Rees & K.M. Cooper, 2005. The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years postdredging). ICES Journal of Marine Science, 62: 145–162.

British Marine Aggregate Producers Association, 2012. Strength from the depths. 6. sustainable development report for the British marine aggregate industry.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Deutsche Rohstoffagentur, 2012. Außenwirtschaftliche Maßnahmen der BRIC-Staaten zur Rohstoffversorgung am Beispiel von Kupfer. DERA Rohstoffinformationen, 12.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Deutsche Rohstoffagentur, 2012. DERA-Rohstoffliste – Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken. DERA Rohstoffinformationen, 10.

Craw, A., 2013. Deep Seabed Mining – An urgent wake-up call to protect our oceans. Greenpeace International.

Erdmann, L. & S. Behrendt, 2011. Kritische Rohstoffe für Deutschland – Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.

European Commission, 2010. Critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.

Hannington, M.D., J. Jamieson, T. Monecke, S. Petersen & S. Beaulieu, 2011. The abundance of seafloor massive sulfide deposits. Geology, 39: 1155–1158.

Hein, J.R., K. Mizell, A. Koschinsky & T.A. Conrad, 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. Ore Geology Reviews, 51: 1–14.

Hein, J. & S. Petersen, 2013a. The geology of manganese nodules. In: E. Baker & Y. Beaudoin (Hrsg.). Deep Sea Minerals: Manganese nodules, a physical, biological, environmental, and technical review. Vol. 1B, Secretariat of the Pacific Community: 7–18.

Hein, J. & S. Petersen, 2013b. The geology of cobalt-rich ferromanganese crusts. In: E. Baker & Y. Beaudoin (Hrsg). Deep Sea Minerals: Cobalt-rich ferromanganese crusts, a physical, biological, environmental, and technical review. Vol. 1C, Secretariat of the Pacific Community: 7–14.

Hein, J.R., F. Spinardi, A. Tawake, K. Mizell, D. Thorburn, 2013. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ. Recent Developments in Atlantic Seabed Minerals Exploration and Other Topics. 42. Conference of the Underwater Mining Institute.

Highley, D.E., L.E. Hetherington, T.J. Brown, D.J. Harrison & G.O. Jenkins, 2007. The strategic importance of the marine aggregate industry to the UK. British Geological Survey, Research report OR/07/019.

International Council for the Exploration of the Sea, 2013. Report of the Working Group on the effects of extraction of marine sediments on the marine ecosystem (WGEXT).

Petersen, S. & J. Hein, 2013. The geology of sea-floor massive sulphides. In: E. Baker & Y. Beaudoin (Hrsg). Deep Sea Minerals: Sea-floor massive sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review. Vol. 1A, Secretariat of the Pacific Community: 7–18.

Rona, P.A., 2008. The changing vision of marine minerals. Ore Geology Reviews 33: 618–666.

Rona, P.A., 2003. Resources of the sea floor. Science 299: 673–674.

Velegrakis, A.F., A. Ballay, S. Poulos, R. Radzevicius, V. Bellec & F. Manso, 2010. European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. Journal of Coastal Research, 51: 1-14.

Wiedicke, M., T. Kuhn, C. Rühlemann, U. Schwarz-Schampera & A. Vink, 2012. Marine mineralische Rohstoffe der Tiefsee – Chance und Herausforderung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News, 40.

The Crown Estate & British Marine Aggregate Producers Association, 2012. The area involved – 14th annual report – Marine aggregate dredging 2011.

www.bir.org/

www.boem.gov/MarineMineralsProgram/

www.deepseaminingoutofourdepth.org/

www.ices.dk

www.isa.org.jm/

http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/

www.seafish.org/industry-support/kingfisher-information-services/kingfisher-bulletins

Kapitel 3 – Energie aus brennendem Eis

Berndt, C., T. Feseker, T. Treude, S. Krastel, V. Liebetrau, H. Niemann, V.J. Bertics, I. Dumke, K. Dünnbier, B. Ferré, C. Graves, F. Gross, K. Hissmann, V. Hühnerbach, S. Krause, K. Lieser, J. Schauer & L. Steinle, 2014. Temporal constraints on hydrate-controlled methane seepage off Svalbard. Science 343, 6168.

Burwicz, E. B., L. Rüpke & 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. Geochimica et Cosmochimica Acta 75, 16: 4562–4576.

Pinero, E., M. Marquardt, C. Hensen, M. Haeckel & K. Wallmann, 2013. Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. Biogeosciences 10, 2: 959–975.

Ruppel, C. D., 2011. Methane Hydrates and Contemporary Climate Change. Nature Education Knowledge 3, 10: 29.

Wallmann, K., E. Pinero, E. Burwicz, M. Haeckel, C. Hensen, A.W. Dale & L. Rüpke, 2012. The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach Energies 5, 7: 2449–2498.

Wallmann, K., M. Haeckel, G. Bohrmann & E. Suess, 2011. Zukünftige kommerzielle Nutzung von Methanhydratvorkommen im Meeresboden, in: Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen & Risiken. Lozan, J.L., H. Gral, L. Karbe & K. Reise (Hrsg.). Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg: 285–288.

http://energy.usgs.gov/OilGas/UnconventionalOilGas/GasHydrates.aspx

www.jogmec.go.jp/english/oil/technology_015.html

www.mh21japan.gr.jp/english/

www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/maincontent.htm

Kapitel 4 – Umweltschonende Förderung und gerechte Verteilung

Deutscher Bundestag, 2012. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Dr. Valerie Wilms, Krista Sager, weiterer Abgeordneter und der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen – Auswirkungen des Tiefseebergbaus auf die maritime Umwelt und Biodiversität. Drucksache 17/8645.

Ezirim, G.E., 2011. Resource governance and conflict in the Niger Delta: Implications for the Gulf of Guinea region. African Journal of Political Science and International Relations 5, 2: 61-71.

Hein, J.R., K. Mizell, A. Koschinsky & T.A. Conrad, 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. Ore Geology Reviews, 51: 1–14.

Hilpert, H.G., S.-A. Mildner (Hrsg.), 2013. Nationale Alleingänge oder internationale Kooperation? Analyse und Vergleich der Rohstoffstrategien der G20-Staaten. Stiftung Wissenschaft und Politik & Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit, SWP-Studie.

International Oil Pollution Compensation Funds, 2012. Incidents involving the IOPC Funds – 2012.

International Oil Pollution Compensation Funds, 2008. Annual Report – Report on the activities of the International Oil Pollution Compensation Funds 2008.
Jenisch, U., 2013. Tiefseebergbau – Lizenzvergabe und Umweltschutz, Natur und Recht, 35, 12: 841–854.

Jenisch, U., 2011. Rohstoffe am Meeresboden – Deutsche Interessen – Finden wird den Anschluss. Marineforum, 11: 6–7.

Jenisch, U., 2010. Renaissance des Meeresbodens – mineralische Rohstoffe und Seerecht. Zeitschrift für öffentliches Recht in Norddeutschland, 10: 373–382.

Mähler, A., 2010. Nigeria: A prime example of the resource curse? Revisiting the oil-violence Link in the Niger Delta. GIGA Working Papers, 120.

Matz-Lück, N., 2013. Deepwater Horizon und internationale Betreiberhaftung für Ölverschmutzungsschäden durch Offshore-Aktivitäten, in: Hecker. B, R. Hendler, A. Proelß & P. Reiff (Hrsg.), Verantwortlichkeit und Haftung für Umweltschäden, Erich Schmidt Verlag, Berlin: 61–72.

Ramos, M.L., 2012. Angola's oil industry operations. Open Society Initiative for Southern Africa.

United Nations Environment Programme, 2012. Environmental assessment of Ogoniland.

Wiedicke, M., T. Kuhn, C. Rühlemann, U. Schwarz-Schampera & A. Vink, 2012. Marine mineralische Rohstoffe der Tiefsee – Chance und Herausforderung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News, 40.

www.iopcfunds.org/

www.isa.org.jm/

Abbildungsverzeichnis

Umschlagabbildung: curraheeshutter/istockphoto.com;
S. 2: Brian J. Skerry/National Geographic Creative; S. 9 v.o.n.u.: Ralph Hinterkeuser; Maurice Tivey, Woods Hole Oceanographic Institution/NSF/ROV Jason; NOAA Okeanos Explorer Program/ Wikimedia Commons; Claudius Diemer, albedo39 Satellitenbildwerkstatt, www.albedo39.de; S. 10/11: Ralph Hinterkeuser; Abb. 1.1: G. H. Eldridge/U.S. Geological Survey; Abb. 1.2: BP; Abb. 1.3: IEA; Abb. 1.4: IEA; Abb. 1.5: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe); Abb. 1.6: BGR; Abb. 1.7: Jiri Rezac/Greenpeace; Abb. 1.8: BGR; Abb. 1.9: Alessandro Viganò/ iStockphoto; Abb. 1.10: nach BGR; Abb. 1.11: nach BGR; Abb. 1.12: IHS; Abb. 1.13: IHS; Abb. 1.14: IHS; Abb. 1.15: Jürgen Willbarth; Abb. 1.16: nach Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung; Abb. 1.17: ESA; Abb. 1.18: nach RWE Dea; Abb. 1.19: nach RWE Dea; Abb. 1.20: maribus; Abb. 1.21: nach Bryan Christie Design; Abb. 1.22: nach Clauss et al.; Abb. 1.23: Rémi Jouan, CC-BY-SA, GNU Free Documentation License, Wikimedia Commons; Abb. 1.24: Bettmann/CORBIS; Abb. 1.25: STR New/Reuters Abb. 1.26: Victor M. Cadelina, Jr.; Abb. 1.27: nach Clauss et.al.; Abb. 1.28: think4photop/iStockphoto; Abb. 1.29 FMC Technologies/statoil ASA; Abb. 1.30: Meteo France Mothy; Abb. 1.31: Time & Life Pictures/Getty Images; Abb. 1.32: maribus; Abb. 1.33: ITOPF, Fernresearch, Lloyds List Intelligence; Abb. 1.34: nach The Times Picayune; Abb. 1.35 Gerald Herbert/ picture alliance/AP Images; Abb. 1.36: picture alliance/dpa Erik S. Lesser; Abb. 1.37: Brian Snyder/Reuters; Abb. 1.38: Lee Celano/Reuters; Abb. 1.39: Dave Martin/picture alliance/AP Photo; Abb. 1.40: maribus; Abb. 1.41: ITOPF; Abb. 1.42: Bonn Agreement; Abb. 1.43: Helcom; Abb. 1.44: maribus; Abb. 1.45: Rajavartiolaitos; Abb. 1.46: DREW WHEELAN/picture alliance/ landov; Abb. 1.47: MATTHEW HINTON/picture alliance/ landov; S. 54/55: Maurice Tivey, Woods Hole Oceanographic Institution/NSF/ROV Jason; Abb. 2.1: picture alliance/CHINA-FOTOPRESS/MAXPPP; Abb. 2.2: Hein et al.; Abb. 2.3: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe); Abb. 2.4: BGR; Abb. 2.5: Wirtgen GmbH; Abb. 2.6: Florian Kopp; Abb. 2.7: Javier Marina/agefotostock/Avenue Images; Abb. 2.8: Photo courtesy British Marine Aggregate Producers Association; Abb. 2.9: Photo courtesy of the Eastern Solent Coastal Partnership, www.escp.org.uk; Abb. 2.10: Charles D. Winters/Nature-Source/Agentur Focus; Abb. 2.11: Hein et al; Abb. 2.12: nach Hein et al; Abb. 2.13: BGR; Abb. 2.14: nach Koschinsky, Jacobs University, Bremen; Abb. 2.15: Hein & Petersen; Abb. 2.16: nach Aker Wirth; Abb. 2.17: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe); Abb. 2.18: nach Hein; Abb. 2.19: nach Hein et al.; Abb. 2.20: Hein; Abb. 2.21: maribus; Abb. 2.22: JAMSTEC; Abb. 2.23: IFE, URI-IAO, UW, Lost City Science Party; NOAA/OAR/OER; Abb. 2.24: BGR; Abb. 2.25: Hannington; Abb. 2.26: maribus/Sven Petersen; Abb. 2.27: Geomar; Abb. 2.28: maribus; Abb 2.29: Geomar/picture alliance/dpa; Abb. 2.30: nach Hein & Petersen; Abb 2.31: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; Abb 2.32: Mike Smith Photography/Nautilus Minerals; S. 96/97: NOAA Okeanos Explorer Program/Wikimedia Commons; Abb. 2.33: maribus; Abb. 2.34: nach Bachraty et al.; Abb. 3.1: Dietmar Gust, Berlin; Abb. 3.2: nach US Department of Energy; Abb. 3.3: Geomar; Abb. 3.4: maribus; Abb. 3.5: Eurico Zimbres/wikimedia commons; Abb. 3.6: Geomar; Abb. 3.7: IEA; Abb. 3.8: maribus; Abb. 3.9: Kyodo/Reuters; Abb. 3.10: Grafik: A. Dibiasi für MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; Foto: V. Diekamp, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; Abb. 3.11: Geometrics/Craig Lippus/VP Seismic Division; Abb. 3.12: Geomar; Abb. 3.13: Anonymous/picture alliance/ASSOCIATED PRESS; Abb. 3.14: NASA Goddard Institute for Space Studies; Abb. 3.15: Geomar; Abb. 3.16: nach Ruppel; S. 120/121: Claudius Diemer, albedo39 Satellitenbildwerkstatt, www.albedo39.de; Abb. 4.1: nach Proelß; Abb. 4.2: ARM, Courtesy: U.S. Department of Energy's Atmospheric Radiation Measurement Program; Abb. 4.3: ISA (International Seabed Authority); Abb. 4.4: maribus; Abb. 4.5: nach ISA; Abb. 4.6: nach GRID-Arendal; Abb. 4.7: China Daily China Daily Information Corp – CDIC/Reuters; Abb. 4.8: Stringer China/ Reuters; Abb. 4.9: STR New/Reuters; Abb. 4.10: Issei Kato/ Reuters; Abb. 4.11: Akintunde Akinleye/Reuters; Abb. 4.12: Kim Jae Hwan/AFP/Getty Images; Abb. 4.13: Columbia Basin Institute of Regional History; S. 146: Brian J. Skerry/National Geographic Creativ

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review" wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.

Partner

Ozean der Zukunft: Im Kieler Exzellenzcluster bündeln Meeres-, Geo- und Wirtschaftswissenschaftler sowie Mediziner, Mathematiker, Juristen und Gesellschaftswissenschaftler ihr Fachwissen und untersuchen gemeinsam den Ozean- und Klimawandel. Insgesamt haben sich mehr als 200 Wissenschaftler aus 7 Fakultäten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, des GEOMAR Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel, des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen.

IOI: Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nichtregierungsorganisation von Professor Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.

mare: Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin, das vielfach für seine hochwertigen Reportagen und Fotostrecken ausgezeichnet wurde, bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.

Danksagung

Die Erstellung einer Publikation wie die des „World Ocean Review“ ist in erster Linie ein Unterfangen, das mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher gilt mein Dank zuerst allen beteiligten Wissenschaftlern, die an dieser Ausgabe mitgewirkt haben. Ein herzliches Dankeschön auch dem gesamten Organisationsteam des Exzellenzclusters für die reibungslose Kommunikation und die Arbeit hinter den Kulissen.

Dank gebührt darüber hinaus insbesondere auch dem Wissenschaftsjournalisten Tim Schröder, der den Texten die allgemeine Verständlichkeit gegeben hat, die es nun auch den „Nicht-Wissenschaftlern“ ermöglicht, den roten Faden nicht aus den Augen zu verlieren. Im Zusammenwirken mit Simone Hoschack, die für die Gestaltung und die Bildredaktion verantwortlich war, und Dimitri Ladischensky, der das Lektorat betreute, möchte ich zuletzt auch Jan Lehmköster herzlich danken, der als Gesamtprojektleiter auf maribus-Seite den „World Ocean Review“ von Beginn an federführend begleitet hat.

Nikolaus Gelpke
Geschäftsführer maribus gGmbH

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster
Redaktion und Text: Tim Schröder
Lektorat: Dimitri Ladischensky
Koordinator Exzellenzcluster: Erna Lange
Redaktionsteam Exzellenzcluster: Erna Lange, Dr. Sven Petersen, Dr. Lars Rüpke, Dr. Emanuel Söding, Dr. Klaus Wallmann
Gestaltung und Satz: Simone Hoschack
Bildredaktion: Simone Hoschack, Jan Lehmköster
Grafiken: Walther-Maria Scheid
Druck: Ruksaldruck GmbH & Co. KG
Papier: Balance Silk, FSC Zertifiziert

ISBN 978-3-86648-220-3
Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com

FSC www.fsc.org MIX Papier aus verantwortungsvollen Quellen FSC® C104247

Print kompensiert Id-Nr. 1434587 www.bvdm-online.de